

Ancuța Maria MĂGUREAN

**Analiza performanței energetice a
clădirilor nerezidențiale
prin tehnici de modelare numerică
și inteligență artificială aplicată**

Teză de doctorat



UTPRESS

Cluj-Napoca, 2021

ISBN 978-606-737-516-9

Ancuța Maria MĂGUREAN

**ANALIZA PERFORMANȚEI ENERGETICE
A CLĂDIRILOR NEREZIDENȚIALE
PRIN TEHNICI DE MODELARE NUMERICĂ ȘI
INTELIGENȚĂ ARTIFICIALĂ APLICATĂ**

TEZĂ DE DOCTORAT



UTPRESS

Cluj - Napoca, 2021

ISBN 978-606-737-516-9



Editura U.T.PRESS
Str. Observatorului nr. 34
400775 Cluj-Napoca
Tel.: 0264-401.999
e-mail: utpress@biblio.utcluj.ro
<http://biblioteca.utcluj.ro/editura>

Director: ing. Călin Câmpean

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

Președinte:	Prof.dr.ing. Ioan POP	Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
Conducător științific:	Prof.dr.ing. Daniela L. MANEA	Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
Conducător științific în cotutelă:	Prof.dr.ing.mat. Dan D. MICU	Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
Referenți:	Prof.dr.ing. Dorina N. ISOPESCU	Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" din Iași
	Prof.dr.ing. Daniel DAN	Universitatea Politehnica Timișoara
	Conf.dr.ing. Ligia M. MOGA	Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Copyright © 2021 Editura U.T.PRESS

Reproducerea integrală sau parțială a textului sau ilustrațiilor din această carte este posibilă numai cu acordul prealabil scris al editurii U.T.PRESS.

ISBN 978-606-737-516-9

Bun de tipar: 21.05.2021

PREFAȚĂ

Teza de doctorat “Analiza performanței energetice a clădirilor nerezidențiale prin tehnici de modelare numerică și Inteligență Artificială aplicată” este specifică domeniului de doctorat “Inginerie Civilă și Instalații”, fiind elaborată în perioada 2012-2018, în Departamentul Construcții Civile și Management al Facultății de Construcții, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

Tematica aleasă vine să completeze cunoștințele într-un domeniu care ia o importanță din ce în ce mai mare, și anume, eficiența energetică a clădirilor ca soluție în contextul mondial al reducerii încălzirii globale, care este o realitate pe care o resimțim cu toții.

Totuși, ca să se poată identifica și cuantifica impactul unor măsuri punctuale care să asigure eficiența energetică a unei clădiri, este firească și necesară îndreptarea atenției asupra metodelor de calcul utilizate. În acest sens, cercetările întreprinse în această teză identifică subiecte mai puțin cunoscute în domeniul performanței termice și energetice a sectorului clădirilor nerezidențiale și își propune să le trateze într-o manieră științifică, oferind posibilitatea dezvoltării cercetărilor aplicative prin intermediul dezvoltării unor cercetări teoretice. Introducerea teoriei similitudinii și a tehnicilor de Inteligență Artificială aplicată (Rețele Neuronale Artificiale) în modelările numerice, în problematica transferului de căldură la interacțiunea clădire-sol, reprezintă o deschidere de drumuri spre cercetările aplicate, ca alternativă la rezolvările clasice prin metode numerice, cu scopul optimizării timpului de lucru și a efortului de calcul.

Totodată, lucrarea tratează, prin cercetări aplicative, soluții constructive curente neabordate în literatura de specialitate, prin elaborarea în cadrul ei a unui catalog de punți termice pentru panourile compozite termoizolate cu înveliș metalic, soluție de închidere caracteristică clădirilor nerezidențiale: industriale, comerciale, showroom-uri, clădiri de retail, etc., oferind un instrument direct de lucru în evaluarea performanței termice a anvelopei clădirilor care utilizează acest tip de soluție, auditorilor energetici pentru clădiri, specialiștilor în inginerie civilă, precum și arhitecților.

În ultima parte, lucrarea tratează eficiența energetică a clădirilor, dintr-o perspectivă integrată, prin studiul introducerii conceptului NZEB (Nearly Zero Energy Building) sau clădiri cu consum de energie aproape egal cu zero, în studii de caz ale unor clădiri nerezidențiale existente, cu scopul identificării unor caracteristici specifice conceptului, însă cu caracter general, contribuind astfel la efortul comun al specialiștilor din domeniu privitor la promovarea acestui concept de proiectare, care aplicat pe scară largă asupra fondului construit existent, poate fi o soluție pentru diminuarea emisiilor de gaze cu efect de seră.

Prin tematica abordată, teza se înscrie în preocupările actuale ale cercetătorilor din domeniul eficienței energetice a clădirilor și aduce contribuții importante în studiul și evaluarea performanței termice și energetice a clădirilor din sectorul nerezidențial.

Elaborarea acestei teze a fost urmărită în permanență, cu multă răbdare, de către conducătorul științific, doamna prorector prof.dr.ing. Daniela MANEA, iar pe parcurs, în echipa noastră s-a alăturat, în calitate de conducător științific în cotutelă, domnul prof.dr.ing.mat. Dan Doru MICU, directorul Laboratorului de Cercetare în Metode Numerice, Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea Tehnică. Țin să-i mulțumesc pe această cale doamnei prof. MANEA, pentru toată îndrumarea și suportul continuu pe care mi le-a acordat. Țin să-i mulțumesc domnului prof. MICU pentru deschiderea arătată acestui domeniu, complementar câmpului curent de interes al dânsului, respectiv pentru încrederea pe care mi-a oferit-o, pășind alături de mine pe acest anevoios drum al cunoașterii.

Mulțumiri speciale vreau să îi acord domnului șef lucrări dr.ing. Levente CZUMBIL, pentru valorosul schimb de idei, generat de pasiunea noastră comună pentru cunoașterea științifică, și să îmi exprim întreaga grațitudine vis-à-vis de implicarea și sprijinul acordat în perioada finală a elaborării acestei teze. De altfel, vreau să îmi exprim recunoștința pentru susținerea permanentă oferită de către tot colectivul Laboratorului de Cercetare în Metode Numerice, Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

Adresez, de asemenea, mulțumiri calde membrilor comisiei de îndrumare, domnilor prof.dr.ing. Ioan POP, prof.dr.ing. Ioan MOGA și prof.dr.ing. Horia-Aurel ANDREICA, pentru sugestiile efectuate în cadrul elaborării și susținerii rapoartelor de cercetare și a tezei de doctorat, respectiv pentru rolul lor important în formarea mea ca om și ca inginer, pe parcursul tuturor ciclurilor de studii universitare, în care mi-au fost alături.

Cu această ocazie, vreau să le mulțumesc domnilor cercetători științifici, dr.ing. Horia PETRAN și dr.ing. Cristian PETCU de la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare URBAN-INCERC – Sucursala INCERC București, pentru schimburile de expertiză și experiență, respectiv de materiale de specialitate, avute în repetate rânduri, care m-au ajutat să îmbunătățesc această teză de doctorat și m-au ajutat să mă dezvolt ca specialist.

Totodată, vreau să mulțumesc familiei mele, tatălui și fratelui meu, pentru încurajarea finalizării acestui vis și pentru sprijinul oferit pe parcurs.

Și nu în ultimul rând, vreau să-i mulțumesc verișorului meu drag, dr.ing. Andrei CECLAN, care reprezintă un model de perseverență și modestie pentru mine, care m-a susținut constant în anii elaborării tezei, în toate aspectele vieții.

Vreau să dedic această teză tuturor celor care cred în performanță prin muncă continuă și corectă, celor care cred în rolul și puterea cercetării științifice în dezvoltarea sănătoasă a unei societăți, celor care au responsabilitatea și viziunea rolului muncii lor, pentru ei și pentru ceilalți membri ai societății, care în final beneficiază de rezultatele ei.

CUPRINS

PREFAȚĂ.....	I
CUPRINS.....	III
LISTA DE FIGURI.....	VIII
LISTA DE TABELE.....	XIV
LISTA DE ABREVIERI ȘI NOTAȚII	XVIII
Capitol 1 Introducere	1
1.1 Contextul actual privind tema eficienței energetice în clădiri	1
1.2 Obiectivele cercetării	3
1.3 Structura tezei de doctorat	5
Capitol 2 Studiu privind proiectarea energetică a clădirilor nerezidențiale.....	7
2.1 Studiu bibliografic al cadrului legislativ și al cadrului normativ aplicabil.....	7
2.1.1 Cadrul legislativ european și american	7
2.1.2 Cadrul legislativ național.....	9
2.1.3 Studiul bibliografic al cadrului normativ european și american	10
2.1.4 Studiul bibliografic al cadrului normativ național	18
2.2 Metode de calcul utilizate în mod curent în proiectarea energetică a construcțiilor ...	20
2.2.1 Prezentarea unor metode analitice de calcul al performanței energetice pentru clădirile nerezidențiale	20
2.2.2 Analiza unor probleme specifice calculului termotehnic prin utilizarea unor metode numerice	22
2.2.3 Termografia în infraroșu ca metodă complementară în analiza energetică.....	27
2.3 Stadiul cercetărilor privind soluțiile constructive de închidere utilizate actual în cazul halelor industriale.....	28
2.3.1 Stadiul cercetărilor în România	28
2.3.2 Stadiul cercetărilor la nivel global.....	29
2.4 Studiul unor construcții industriale realizate și a soluțiilor utilizate.....	30
2.4.1 Introducere în domeniul construcțiilor industriale	30
2.4.2 Detalii constructive utilizate actual pentru închiderile halelor industriale.....	34
2.5 Concluzii	36

Capitol 3 Evaluarea performanței termice a panourilor compozite termoizolate cu înveliș metalic prin analiză numerică.....37

3.1 Elemente teoretice pentru determinarea fluxului termic, a temperaturilor și a coeficienților liniari de transfer termic	37
3.1.1 Descrierea modelului matematic al programului utilizat în simularea numerică a câmpului termic bidimensional în regim termic staționar.....	37
3.1.2 Relații analitice pentru determinarea coeficienților liniari de transfer termic...	41
3.2 Condiții de analiză numerică a detaliilor constructive.....	42
3.2.1 Reguli de modelare ale geometriei detaliilor constructive analizate.....	42
3.2.2 Condiții de contur aplicate pe tip de detaliu	43
3.2.2.1 <i>Rezistențe termice superficiale</i>	43
3.2.2.2 <i>Rezistența termică a spațiilor de aer</i>	44
3.2.3 Temperaturi de calcul și caracteristici termotehnice ale materialelor utilizate .	47
3.2.3.1 <i>Temperaturi de calcul</i>	47
3.2.3.2 <i>Caracteristici termotehnice materiale</i>	47
3.3 Analiza numerică a unor detalii de îmbinări între elementele anvelopei clădirii	48
3.3.1 Detaliu de îmbinare panouri de perete la colț.....	48
3.3.2 Detalii de îmbinări orizontale între panouri de perete.....	49
3.3.2.1 <i>Detaliu îmbinare orizontală panouri de perete</i>	49
3.3.2.2 <i>Detaliu îmbinare orizontala panouri perete – îmbinare ascunsă</i>	51
3.3.3 Detaliu de îmbinare panou de perete cu panou de acoperiș	51
3.3.4 Detaliu de îmbinare tâmplărie PVC cu panou de perete	53
3.3.5 Detaliu de îmbinare panou de perete cu placa pe sol	55
3.3.5.1 <i>Detaliu de îmbinare panou de perete cu placa pe sol - tip 1</i>	55
3.3.5.2 <i>Detaliu de îmbinare panou de perete cu placa pe sol – tip 2</i>	56
3.3.6 Detaliu de îmbinare panouri acoperiș la coamă	58
3.3.7 Detalii de îmbinare între panouri de acoperiș	59
3.3.7.1 <i>Detaliu de îmbinare între panouri de acoperiș – tip 1</i>	59
3.3.7.2 <i>Detaliu de îmbinare între panouri de acoperiș – tip 2</i>	61
3.4 Propuneri de detalii constructive optimizate din punct de vedere energetic pentru elementele anvelopei.....	62
3.5 Studiu parametric al impactului punților termice în elementele anvelopei clădirii	68
3.6 Contribuții și concluzii.....	73

Capitol 4 Studiul comprehensiv al transferului de căldură la plăci pe sol de dimensiuni mari prin utilizarea metodelor numerice 76

4.1 Metode de calcul al transferului de flux termic aplicabile specificului problematicei studiate: plăci pe sol de dimensiuni mari	77
4.1.1 Metode analitice de calcul a pierderilor termice prin sol	77
4.1.2 Considerente teoretice în modelarea numerică a transferului de căldură în câmp bidimensional și tridimensional, în regim termic staționar și nestaționar. Exemple de calcul	78
4.1.3 Aplicarea teoriei similitudinii în modelul de calcul de transfer termic în regim nestaționar	88
4.2 Condiții de analiză numerică	89
4.2.1 Caracteristici geometrice	90
4.2.2 Condiții de contur	92
4.2.3 Caracteristici termotehnice material	98
4.2.4 Condiții inițiale în cazul simulărilor în regim nestaționar	99
4.2.5 Ipoteze de calcul considerate în studiile numerice	100
4.3 Studiul parametric al transferului de flux termic la plăci pe sol de dimensiuni mari în regim termic nestaționar	101
4.3.1 Parametrii care influențează rezultatele simulărilor numerice în regim nestaționar	101
4.3.2 Simulare numerică cu pas orar a plăcii de dimensiune 30x30 m pe durata de 8 ani	104
4.3.3 Propunerea unui model simil pentru modele numerice	112
4.3.4 Simulări numerice de lungă durată cu pas orar a plăcii de dimensiune echivalentă 30x30 m prin utilizarea modelului simil. Studiul influenței modului de inițializare al simulării în regim nestaționar	117
4.3.5 Studiul parametric al transferului de flux termic de lungă durată la plăci pe sol de dimensiuni mari prin utilizarea modelului simil.....	120
4.3.5.1 Simulare numerică de lungă durată cu pas orar a plăcii pe sol de dimensiune echivalentă 50x50 m	120
4.3.5.2 Simulare numerică de lungă durată cu pas orar a plăcii pe sol de dimensiune echivalentă 60x60 m	121
4.3.5.3 Simulare numerică de lungă durată cu pas orar a plăcii pe sol de dimensiune echivalentă 70x70 m	122
4.3.5.4 Simulare numerică de lungă durată cu pas orar a plăcii pe sol de dimensiune echivalentă 100x100 m	122
4.4 Efecte specifice identificate în transferul de căldură al plăcilor pe sol de dimensiuni mari	123

4.5	Comparația rezultatelor numerice cu rezultate obținute prin modele analitice	128
4.6	Contribuții și concluzii.....	131
Capitol 5 Aplicarea tehnicilor de Inteligență Artificială în studiul transferului de căldură la plăci pe sol de dimensiuni mari.....		133
5.1	Fundamentarea oportunității introducerii Inteligenței Artificiale în aplicații în inginerie civilă și considerații teoretice.....	133
5.1.1	Inteligență Artificială în inginerie civilă	133
5.1.2	Descriere metode specifice Inteligenței Artificiale: Rețele Neuronale Artificiale	134
5.1.3	Algoritmul Bayesian de regularizare a ponderilor RNA.....	138
5.2	Aplicația 1 în AI implementată printr-o metodă hibridă de tip “grey box” [140].....	139
5.3	Aplicația 2 în AI implementată printr-o metodă de tip “black box”.....	145
5.4	Contribuții și concluzii.....	153
Capitol 6 Studii de caz de implementare concept NZEB în fondul construit existent în sectorul nerezidențial		155
6.1	Conceptul NZEB, ca soluție în contextul european al economiei de energie în clădiri	155
6.2	Inițiative de implementare NZEB în clădiri existente la nivel european – Studiu de caz 1: Proiectul neZEH	158
6.2.1	Proiectul neZEH – descrierea și scopul proiectului	158
6.2.2	Studiu de caz 1.A.....	159
6.2.2.1	<i>Descriere caracteristici clădire</i>	159
6.2.2.2	<i>Analiza vizuală și termografică</i>	162
6.2.2.3	<i>Analiza performanței termice a elementelor anvelopei clădirii</i>	164
6.2.2.4	<i>Analiza performanței energetice a clădirii</i>	167
6.2.2.5	<i>Soluții și detalii optimizate energetic, analiza tehnico-economică</i> ...	170
6.2.3	Studiu de caz 1.B.....	175
6.2.3.1	<i>Descriere caracteristici clădire</i>	175
6.2.3.2	<i>Analiza vizuală și termografică</i>	177
6.2.3.3	<i>Analiza performanței termice a elementelor anvelopei clădirii</i>	179
6.2.3.4	<i>Analiza performanței energetice a clădirii</i>	183
6.2.3.5	<i>Soluții și detalii optimizate energetic, analiza tehnico-economică</i> ...	186

6.3	Inițiative de implementare NZEB în clădiri existente la nivel național – Studiu de caz 2: Spitale județene transformate în NZEB	190
6.3.1	NZEB în România în clădiri publice existente.....	190
6.3.2	Studiu de caz 2	190
6.3.2.1	<i>Descriere caracteristici clădire</i>	190
6.3.2.2	<i>Analiza vizuală și termografică</i>	191
6.3.2.3	<i>Analiza performanței termice a elementelor anvelopei clădirii</i>	193
6.3.2.4	<i>Analiza performanței energetice a clădirii</i>	196
6.3.2.5	<i>Soluții și detalii optimizate energetic, analiza tehnico-economică</i> ...	197
6.4	Contribuții și concluzii.....	206
Capitol 7 Concluzii, contribuții, diseminare rezultate și direcții viitoare de cercetare.		209
7.1	Concluzii	209
7.2	Contribuții	213
7.3	Diseminare rezultate	219
7.4	Direcții viitoare de cercetare	220
BIBLIOGRAFIE.....		221

LISTA DE FIGURI

Fig. 1.1 Emisii globale de CO ₂ în perioada 1965-2016 (pe baza datelor statistice din [6])	1
Fig. 1.2 Consum de energie finală pe sectoare în România (pe baza datelor statistice din [7]) 2	
Fig. 2.1 Consumul de energie în diferite sectoare la nivel global [10].....	7
Fig. 2.2 Grila necesar de energie primară în certificarea energetică în Germania conform EnEv2014.....	12
Fig. 2.3 Grile ale consumului de energie primară în certificarea energetică în Germania conform EnEv2014	13
Fig. 2.4 Valori de referință ale coeficientului special de pierderi termice prin transmisie pentru clădirea de referință din sectorul terțiar în Germania	22
Fig. 2.5 Pașii de lucru necesari în analiza numerică a unui detaliu constructiv în programul THERM.....	25
Fig. 2.6 Simulare numerică - detaliu îmbinare panouri de perete termoizolate cu înveliș metalic de tip sandwich	25
Fig. 2.7 Imagine termografică a fațadei unei clădiri [60]	27
Fig. 2.8 Panou sandwich multifuncțional cu structură celulară expandată mecanic ExpaAsym, al cărui spațiu intracelular este umplut cu materiale stohastice [63]	29
Fig. 2.9 Panouri termoizolate cu înveliș metalic de tip sandwich identificate în mod curent pe piața din România	31
Fig. 2.10 Soluții de închidere pentru halele pe structură din beton armat [68].....	32
Fig. 2.11 Fostă hală din Cluj-Napoca transformată în bloc de locuințe cu păstrarea structurii de rezistență inițiale	32
Fig. 2.12 Clădiri din sectorul nerezidențial realizate închideri din panouri de tip sandwich [70]	33
Fig. 2.13 Detalii îmbinare panouri de acoperiș.....	34
Fig. 2.14 Detaliu îmbinare transversală panouri de acoperiș.....	34
Fig. 2.15 Detalii îmbinare panouri de perete	35
Fig. 2.16 Detalii de îmbinare panouri la streășină	35
Fig. 2.17 Detalii de îmbinare panou perete cu placa pe sol	35
Fig. 3.1 Regula „Cross-String”.....	39
Fig. 3.2 Puncte de integrare pentru Cuadratura Gaussiană de ordinul doi [71].....	40
Fig. 3.3 Lungimea de secționare cu planuri adiabactice – specificații SR EN 10211	42
Fig. 3.4 Lungimea de secționare cu planuri adiabactice zona ferestre – specificații SR EN10077	42
Fig. 3.5 Transformarea unei forme geometrice neregulate în patrulatere regulate echivalente [78].....	46
Fig. 3.6 Detaliu modelare geometrică îmbinare între panouri de perete - la colț	48
Fig. 3.7 Linii izoterme detaliu 3.3.1.....	48

Fig. 3.8 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.1	48
Fig. 3.9 Detaliu îmbinare orizontală panouri de perete	49
Fig. 3.10 Detaliu modelare geom.....	50
Fig. 3.11 Linii izoterme det. 3.3.2.1.....	50
Fig. 3.12 Suprafețe izoterme det. 3.3.2.1	50
Fig. 3.13 Detaliu îmbinare ascunsă panouri de perete	51
Fig. 3.14 Detaliu modelare geometrică.....	51
Fig. 3.15 Linii izoterme detaliu 3.3.2.2.....	51
Fig. 3.16 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.2.2	51
Fig. 3.17 Det. îmbinare panou de perete cu panou de acoperiș	52
Fig. 3.18 Detaliu modelare geometrică.....	52
Fig. 3.19 Linii izoterme detaliu 3.3.3.....	52
Fig. 3.20 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.3	52
Fig. 3.21 Detaliu de îmbinare panou de perete cu fereastra.....	53
Fig. 3.22 Detaliu modelare geom.....	54
Fig. 3.23 Linii izoterme det. 3.3.4.....	54
Fig. 3.24 Suprafețe izoterme det. 3.3.4	54
Fig. 3.25 Detaliu prindere panou perete de grindă de fundare.....	55
Fig. 3.26 Detaliu modelare geometrie zone interstițiale	55
Fig. 3.27 Linii izoterme detaliul 3.3.5.1	56
Fig. 3.28 Suprafețe izoterme detaliul 3.3.5.1	56
Fig. 3.29 Detaliu îmbinare panou perete cu placa pe sol – tip 2.....	57
Fig. 3.30 Modelare geom. detaliu 3.3.5.2	57
Fig. 3.31 Linii izoterme detaliu 3.3.5.2.....	57
Fig. 3.32 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.5.2	57
Fig. 3.33 Detaliu de îmbinare panouri acoperiș, la coamă.....	58
Fig. 3.34 Modelare geometrică - detaliu protecție hidroizolație la coamă	59
Fig. 3.35 Linii izoterme detaliu 3.3.6.....	59
Fig. 3.36 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.6	59
Fig. 3.37 Detaliu modelare geometrică.....	60
Fig. 3.38 Linii izoterme detaliu 3.3.7.1.....	60
Fig. 3.39 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.7.1	60
Fig. 3.40 Model numeric adițional pentru determinarea rezistenței termice a panoului de acoperiș fără influența punții termice principale analizate	60
Fig. 3.41 Detaliu modelare geometrică îmbinare între panouri de acoperiș – tip 2.....	61
Fig. 3.42 Linii izoterme detaliu 3.3.7.2.....	61
Fig. 3.43 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.7.2	61

Fig. 3.44 Detalii de modelare geometrică pentru soluțiile de tip 1 - suprapunere 30 cm panou perete pe soclu.....	63
Fig. 3.45 Detalii de modelare geometrică pentru soluțiile de tip 2 – termoizolare soclu și fundație	63
Fig. 3.46 Detalii de simulare numerică pentru soluția 2.c	64
Fig. 3.47 Detalii de simulare numerică pentru soluția 2.d.....	64
Fig. 3.48 Detalii de simulare numerică pentru soluția 2.f.....	64
Fig. 3.49 Detalii de simulare numerică pentru soluția 2.g.....	64
Fig. 3.50 Schiță amplasare punți termice în cadrul fațadei analizate – Cazuri A1, A2	69
Fig. 3.51 Schiță amplasare punți termice în cadrul fațadei analizate – Cazuri B1, B2.....	69
Fig. 3.52 Analiza influenței punților termice asupra fațadei analizate – Caz A1	70
Fig. 3.53 Analiza influenței punților termice asupra fațadei analizate – Caz A2	70
Fig. 3.54 Analiza influenței punților termice asupra fațadei analizate – Caz B1	71
Fig. 3.55 Analiza influenței punților termice asupra fațadei analizate – Caz B2	71
Fig. 3.56 Analiza influenței punților termice asupra planșeului acoperiș analizat – Caz C1 ..	73
Fig. 3.57 Analiza influenței punților termice asupra planșeului acoperiș analizat – Caz C2 ..	73
Fig. 4.1 Distribuția fluxului termic în cazul existenței apei subterane [80], [81].....	77
Fig. 4.2 Procesul de transfer de căldură într-un perete plan omogen	78
Fig. 4.3 Discretizarea modelului numeric în elemente finite.....	82
Fig. 4.4 Aproximarea funcției $TEFn(e)$ pe subdomenii prin intermediul funcțiilor de interpolare	83
Fig. 4.5 Variația temperaturii în sol cu adâncimea la Cluj-Napoca pentru un an calendaristic	91
(profil de temperatură reprezentat pentru ziua 01 a lunii i , ora 01:00).....	91
Fig. 4.6 Colț bisimetric al plăcii pe sol de dimensiune 30x30 m.....	92
Fig. 4.7 Transferul de căldură într-un perete plan - model comprehensiv.....	95
Fig. 4.8 Temperaturi interioare pe durata perioadei de neîncălzire	96
Fig. 4.9 Temperaturi exterioare orare pentru Cluj-Napoca, România [°C]	97
Fig. 4.10 Configurații rețea discretizare în EF pentru modelul Test	102
Fig. 4.11 Discretizarea în elemente finite a modelului cu placă 30x30m.....	104
Fig. 4.12 Amplasarea secțiunilor în modelul geometric pentru analiza rezultatelor numerice.....	107
Fig. 4.13 Variația temperaturii în sol în Secțiunea orizontală 1-1, în Sezonul 4 de încălzire	108
Fig. 4.14 Variația distribuției temperaturii superficiale pe placa pe sol în Secțiunea 2-2, în Sezonul 4 de încălzire	108
Fig. 4.15 Temperaturi exterioare orare loc. Cluj-Napoca pe intervale de timp.....	109
Fig. 4.16 Variația temperaturii în sol în Secțiunea verticală 3-3 în Anul 4	109
Fig. 4.17 Variația orară a temperaturilor în Secțiunea 3-3 în 1 ian. ora 1, din anul 2 până în anul 6.....	110
Fig. 4.18 Variația temperaturii în sol în Secțiunea verticală 4-4 în Anul 4	110

Fig. 4.19 Variația amplitudinii temperaturii pe placă și în sol cu adâncimea în Secțiunea 3-3 pe durata Anului 4	111
Fig. 4.20 Variația amplitudinii temperaturii în sol cu adâncimea în Secțiunea 4-4 pe durata Anului 4	111
Fig. 4.21 Transformarea modelului real, sc. 1:1, în model simil, sc. 1:10	113
Fig. 4.22 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a cinci sezoane de încălzire pentru ColtPlaca 30x30 m_Simil 1:10	118
Fig. 4.23 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a 5 sezoane de încălzire ColtPlaca_30x30 m_Simil 1:10 – după inițializare model numeric de tip “preîncălzire” sol.....	119
Fig. 4.24 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a 5 sezoane de încălzire ColtPlaca 50x50 m_Simil 1:10.....	120
Fig. 4.25 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a cinci sezoane de încălzire ColtPlaca 60x60m_Simil 1:10	121
Fig. 4.26 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a cinci sezoane de încălzire ColtPlaca 70x70m_Simil 1:10	122
Fig. 4.27 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a 5 sezoane de încălzire ColtPlaca 100x100m_Simil 1:10.....	123
Fig. 4.28 Reducerea densității medii de flux la creșterea dimensiunilor plăcii pentru primele cinci sezoane de încălzire.....	124
Fig. 4.29 Rezultate comparative între modelele analitice conform C107/5-2005 și modelele numerice comprehensive	130
Fig. 4.30 Rezultate comparative între modelele analitice conform SR EN13370 și modelele numerice comprehensive	131
Fig. 5.1 Schema principială a unei rețele neuronale feedforward multistrat	136
Fig. 5.2 Arhitectura rețelelor neuronale artificiale implementate cu 2 straturi ascunse/ 1 strat de ieșire	142
Fig. 5.3 Verificare performanță RNA: Regresie pentru rețeaua neuronală 2-10-30-1	143
Fig. 5.4 Distribuția erorilor pentru seturile de valori pentru antrenare și pentru testare suplimentară a rețelelor neuronale	144
Fig. 5.5 Predicționare de lungă durată a pierderilor de căldură a colțului plăcii pe sol de dimensiune 30x30 m.....	144
Fig. 6.1 Structura fondului de clădiri existent din sectorul nerezidențial în România [142].	155
Fig. 6.2 Încadrarea în zonă a clădirii.....	159
Fig. 6.3 Studiu de caz 1.A: Zone de calcul pe planul demisol.....	161
Fig. 6.4 Studiu de caz 1.A: Zone de calcul pe planul parter	161
Fig. 6.5 Camera de termoviziune utilizată	162
Fig. 6.6 Imagini ale clădirii 1.A	162
Fig. 6.7 Suprafața exterioară a fațadei SV (zonă acces principal)	163
Fig. 6.8 Suprafața interioară perete exterior etajul 1, pe fațada SV	163

Fig. 6.9 Suprafața interioară perete în zona de îmbinare cu fereastra, cameră la etajul 2, fațada NV.....	163
Fig. 6.10 Suprafața interioară a buiandrugului hol principal, etaj 2, fațada NE	163
Fig. 6.11 Detaliu vertical - intersecție panouri metalice sandwich de acoperiș cu atic din beton armat neetermoizolat	165
Fig. 6.12 Detaliu vertical - intersecție panouri sandwich de acoperiș cu jgheab de scurgere a apelor pluviale.....	165
Fig. 6.13 Detaliu vertical - intersecție panouri metalice sandwich de acoperiș cu atic de zidărie din BCA	165
Fig. 6.14 Detaliu vertical - îmbinare perete exterior cu planșeu din b.a. în consolă, cota +3.59 m – tip 1	165
Fig. 6.15 Detaliu vertical - îmbinare perete exterior cu planșeu din b. a., cota +3.59 m – tip 2	165
Fig. 6.16 Detaliu vertical - intersecție perete exterior cu planșeu din b. a., cota +3.59 m – tip 3	166
Fig. 6.17 Temperaturi în spațiul neîncălzit (spațiul secundar).....	168
Fig. 6.18 Soluții propuse de etanșare a îmbinărilor tâmplărie fereastră/ ușă cu perețele exterior [161].....	171
Fig. 6.19 Soluții propuse pentru termoizolare - materiale termoizolante	172
Fig. 6.20 Detaliu vertical optimizat - intersecție panouri compozite termoizolate cu atic din beton armat.....	173
Fig. 6.21 Detaliu vertical optimizat - îmbinare pereți exteriori cu planșeu din b.a. în consolă, cota +3.59 m– tip 1	173
Fig. 6.22 Detaliu vertical optimizat - îmbinare pereți ext. cu planșeu din b.a.,cota +3.59 m–tip 2.....	173
Fig. 6.23 Detaliu vertical optimizat - intersecție pereți ext. cu planșeu din b.a.,cota +3.59 m– tip 3	173
Fig. 6.24 Economii de energie cu pachetul de măsuri propuse pentru modernizarea Clădirii 1.A	175
Fig. 6.25 Încadrarea în zonă a clădirii 1.B.....	176
Fig. 6.26 Imagini ale clădirii 1.B	177
Fig. 6.27 Imagini ale clădirii 1.B efectuate pe parcursul execuției lucrărilor de extindere și renovare din 2007	178
Fig. 6.28 Suprafața exterioară a pereților de pe fațada Vest	178
Fig. 6.29 Suprafața exterioară a pereților de pe fațada Sud	178
Fig. 6.30 Suprafața exterioară a pereților de pe fațada Nord	179
Fig. 6.31 Detaliu vertical - intersecție atic zidărie cărămidă cu planșeu de lemn,cota+16.75m	180
Fig. 6.32 Detaliu vertical - intersecție planșeu din beton armat cu planșeu din lemn, cota +16.75 m	180
Fig. 6.33 Detaliu vertical - intersecție planșeu sub pod neîncălzit cu planșeu terasă din lemn, cota +16.75 m	180

Fig. 6.34 Detaliu vertical - intersecție perete exterior cu planșeu din beton armat peste cota: +9.64 m	180
Fig. 6.35 Temperaturi în spațiul neîncălzit 1: Casa scării Est	183
Fig. 6.36 Temperaturi în spațiul neîncălzit 2: Casa scării Vest	184
Fig. 6.37 Temperaturi în spațiul neîncălzit 3: Spațiu tehnic între mezanin și etaj 1 (deasupra săli conferințe)	184
Fig. 6.38 Temperaturi în spațiul neîncălzit 4: Spațiu tehnic între mezanin și etaj 1 (deasupra zonă expozițională)	184
Fig. 6.39 Temperaturi în spațiul neîncălzit 5: Depozite neîncălzite, sub zona expozițională 184	
Fig. 6.40 Temperaturi în spațiul neîncălzit 6: Puț lift panoramic de pe latura nordică a clădirii	184
Fig. 6.41 Detaliu vertical optimizat - intersecție planșeu sub pod neîncălzit cu pl. terasă din lemn, cota +16.75 m	187
Fig. 6.42 Detaliu vertical optimizat - intersecție perete exterior cu planșeu din beton armat peste cota: +9.64 m	187
Fig. 6.43 Economii de energie cu pachetul de măsuri propuse pentru modernizarea Clădirii 1.B	189
Fig. 6.44 Imagini ale clădirii 2.....	192
Fig. 6.45 Suprafața exterioară a pereților de pe fațada SE – imagini termografice	193
Fig. 6.46 Suprafața exterioară a pereților de pe fațada NV – imagini termografice.....	193
Fig. 6.47 Detaliu intersecție perete exterior P1 cu planșeu din lemn, sub pod P11 (secțiune verticală)	194
Fig. 6.48 Detaliu intersecție perete neîncălzit casa scării cu planșeu din lemn, spre pod neîncălzit (secțiune verticală)	194
Fig. 6.49 Detaliu intersecție perete neîncălzit mansardă spre pod neîncălzit și planșeu lemn (secțiune verticală).....	194
Fig. 6.50 Detaliu intersecție perete ext. cu planșeu inferior Pl.4.1 (fațadă SE, Salon 13B, Salon 7 – Etajul 1) – ieșind (secțiune verticală).....	195
Fig. 6.51 Detaliu intersecție perete exterior P6 cu planșeu terasă Pl.3.2 – peste departament Bronhologie (ieșind)	195
Fig. 6.52 Detaliu intersecție perete exterior cu planșeu exterior inferior peste subsol (Pl. 4.2/ Pl. 4.3).....	195
Fig. 6.53 Detaliu intersecție per. ext. cu pl. inferior Pl.4.1 (fațadă SE, Salon 13B, Salon 7 – Etajul 1) - ieșind.....	197
Fig. 6.54 Detaliu intersecție per. ext. P1 cu planșeu din lemn, sub pod, P11	199
Fig. 6.55 Detaliu int. per. neîncălzit casa scării cu planșeu din lemn, spre pod neîncălzit....	200
Fig. 6.56 Detaliu int. per. ext. cu planșeu terasă Pl.5 – peste dep. Bronhologie (intrând).....	201
Fig. 6.57 Detaliu int. per. ext. cu planșeu terasă Pl.5 – peste dep. Bronhologie (intrând).....	201
Fig. 6.58 Detaliu int. per. ext. cu planșeu ext. inferior subsol (Pl. 4.2/ Pl. 4.3).....	201
Fig. 6.59 Studiu de caz 2: Situație comparativă consumuri de energie: clădire reală vs. NZEB	204

LISTA DE TABELE

Tab. 2.1 Cerințe minime de performanță termică în țările europene la nivelul anilor '70-'80	10
Tab. 2.2 Cerințe de performanță termică în Germania la nivelul anilor '80.....	10
Tab. 2.3 Cerințe de performanță termică în Germania, conform EnEv2008.....	11
Tab. 2.4 Cerințe de performanță termică în Germania, conform EnEv2014.....	12
Tab. 2.5 Valori minime ale rezistenței termice pentru clădiri din sectorul nerezidențial în SUA conform ASHRAE 90.1 - 2010.....	15
Tab. 2.6 Valori minime ale rezistenței termice pentru clădiri din sectorul nerezidențial în SUA conform ASHRAE 90.1 - 2016.....	15
Tab. 2.7 Valori minime ale rezistenței termice pentru clădiri semi-încălzite în SUA conform ASHRAE 90.1 - 2010.....	16
Tab. 2.8 Valori minime ale rezistenței termice pentru clădiri semi-încălzite în SUA conform ASHRAE 90.1 - 2016.....	16
Tab. 2.9 Valorile maxime admise pentru indicatorul PAL în Japonia.....	17
Tab. 2.10 Rezistențe minime corectate pentru clădiri industriale de categoria 1 conform C107/5-2005.....	18
Tab. 2.11 Rezistențe minime corectate pentru clădiri industriale de categoria 2 conform C107/5-2005.....	19
Tab. 2.12 Rezistențe minime corectate pentru clădiri industriale conform C107/5-2005, actualizat în 2011.....	19
Tab. 3.1 Valorile coeficienților de transfer superficial prin convecție.....	43
Tab. 3.2 Valorile rezistențelor termice superficiale pentru valoarea emisivității specifică oțelului galvanizat nou.....	44
Tab. 3.3 Rezistențe termice superficiale pentru valoarea emisivității specifică oțelului galvanizat învechit.....	44
Tab. 3.4 Conductivități termice de calcul utilizate pentru materiale de construcții și sol.....	47
Tab. 3.5 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul de îmbinare între panouri de perete - la colț.....	49
Tab. 3.6 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare orizontală între panouri de perete.....	50
Tab. 3.7 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare ascunsă între panouri de perete.....	51
Tab. 3.8 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare perete cu acoperiș.....	53
Tab. 3.9 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare perete cu fereastra.....	54
Tab. 3.10 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare perete cu placa pe sol – tip 1.....	56
Tab. 3.11 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare perete cu placa pe sol – tip 2.....	58

Tab. 3.12 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare panouri de acoperiș la coamă	59
Tab. 3.13 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul de îmbinare între panouri de acoperiș	60
Tab. 3.14 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul de îmbinare între panouri de acoperiș	61
Tab. 3.15 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul 3.3.5.1, optimizat prin soluții de tip 1	65
Tab. 3.16 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul 3.3.5.1, optimizat prin soluții de tip 2	66
Tab. 3.17 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul 3.3.5.1 optimizat prin soluții de tip 1+2	67
Tab. 3.18 Caracteristici geometrice ale fațadelor de pereți analizate	68
Tab. 3.19 Rezistențe termice corectate obținute pentru fațadele analizate	72
Tab. 3.20 Date de intrare și rezultate obținute pentru planșeul de tip terasă necirculabilă analizat	72
Tab. 4.1 Analiză comparativă valori coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliu 3.3.5.2	76
Tab. 4.2 Studiu comparativ de formulare MEF mecanica solidului deformabil vs. transferul de căldură.....	80
Tab. 4.3 Centralizator condiții de contur	95
Tab. 4.4 Definierea temperaturilor interioare în funcția $T_{int}(t)$	97
Tab. 4.5 Caracteristici termotehnice sol	98
Tab. 4.6 Caracteristici termotehnice ale materialelor de construcție.....	99
Tab. 4.7 Sinteza condiții de contur pentru modelul Test	101
Tab. 4.8 Parametrii utilizați pentru modelul Test și durata simulării	101
Tab. 4.9 Temperaturi superficiale exterioare obținute în modelele Test	102
Tab. 4.10 Intervale orare ale studiilor numerice intermediare pentru placa 30x30m	106
Tab. 4.11 Coordonatele carteziane ale secțiunilor pentru modelul 30x30 m scara 1:1	107
Tab. 4.12 Dimensiuni geometrice model simil scara 1:10.....	113
Tab. 4.13 Caracteristici termotehnice model simil scara 1:10.....	114
Tab. 4.14 Determinarea erorii de calcul între rezultate modele simile scalate 1:10, 1:20 și modelul de referință	114
Tab. 4.15 Coordonatele carteziane ale secțiunilor în modelul de referință sc. 1:1 vs. modelul simil sc.1:10	115
Tab. 4.16 Rezultate comparative pentru câmpul de temperaturi model de referință sc. 1:1 vs. simil sc. 1:10	115
Tab. 4.17 Variația pierderilor de căldură pe durata a cinci sezoane de încălzire model ColtPlaca 30x30m_Real	116
Tab. 4.18 Variația pierderilor de căldură pe durata a cinci sezoane de încălzire model ColtPlaca 30x30m_Simil.....	117

Tab. 4.19 Variația pierderilor termice de la un an la altul pentru modelul ColtPlaca 30x30m_Simil 1:10 – după inițializare model numeric de tip “preîncălzire” sol.....	119
Tab. 4.20 Variația pierderilor termice de la un an la altul pentru modelul Placa 50x50m_Simil 1:10	121
Tab. 4.21 Variația pierderilor termice de la un an la altul pentru modelul Placa 60x60m_Simil 1:10	121
Tab. 4.22 Variația pierderilor termice de la un an la altul pentru modelul Placa 70x70m_Simil 1:10	122
Tab. 4.23 Variația pierderilor termice de la un an la altul pentru modelul Placa 100x100m_Simil 1:10.....	123
Tab. 4.24 Studiul distribuției temperaturilor sub placă în cazul opririi încălzirii pe durata unui an calendaristic – Model ColtPlaca 30x30m_Simil 1:10.....	125
Tab. 4.25 Centralizator caracteristici modele analitice conform SR EN 13370 și C107/5 ...	128
Tab. 4.26 Rezultate intermediare în calculul pierderilor de căldură prin relații analitice	129
Tab. 5.1 Valori orare ale fluxului termic pe suprafața plăcii obținute prin simulări numerice.....	141
Tab. 5.2 Centralizatorul performanțelor rețelelor neuronale pentru valorile predicționate ...	143
Tab. 5.3 Rezultate performanță rețele neuronale analizate pentru Aplicația 2	149
Tab. 5.4 Centralizator cu performanțele rețelei neuronale de referință pe cele cinci calculatoare utilizate.....	151
Tab. 6.1 Alți parametri de calcul termotehnic ai clădirii 1.A	166
Tab. 6.2 Studiu de caz 1.A: Caracteristici geometrice și termice – situație inițială, Zona 1 .	166
Tab. 6.3 Studiu de caz 1.A: Caracteristici geometrice și termice – situație inițială, Zona 2 .	167
Tab. 6.4 Studiu de caz 1.A: Caracteristici geometrice și termice – situație inițială, Zona 3 .	167
Tab. 6.5 Studiu de caz 1.A: Caracteristici geometrice și termice – situație inițială, Zona 4 .	167
Tab. 6.6 Studiu de caz 1.A: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea reală.....	170
Tab. 6.7 Studiu de caz 1.A: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea de referință	170
Tab. 6.8 Studiu de caz 1.A: Performanțe termice ale elementelor anvelopei după termoizolare	172
Tab. 6.9 Studiu de caz 1.A: Analiză tehnico-economică 1	174
Tab. 6.10 Studiu de caz 1.A: Analiza tehnico-economică 2	174
Tab. 6.11 Studiu de caz 1.A: Analiză tehnico-economică 3	174
Tab. 6.12 Studiu de caz 1.A: Indicatori economici.....	174
Tab. 6.13 Cuantificare economii de energie și financiare totale pe pachetul de măsuri global.....	175
Tab. 6.14 Studiu de caz 1.B: Caracteristici geometrice și termice Zona 1 (stg.) / Zona 2 (dr.).....	181
Tab. 6.15 Studiu de caz 1.B: Caracteristici geometrice și termice Zona 3 (stg.) / Zona 4 (dr.) / Zona 7 (dr. jos).....	181

Tab. 6.16 Studiu de caz 1.B: Caracteristici geometrice și termice Zona 5 (stg.) / Zona 6 (dr.).....	182
Tab. 6.17 Alți parametri de calcul termotehnic ai clădirii 1.B	182
Tab. 6.18 Studiu de caz 1.B: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea reală.....	185
Tab. 6.19 Studiu de caz 1.B: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea de referință.....	185
Tab. 6.20 Studiu de caz 1.A:Performanțe termice ale elementelor anvelopei după termoizolare	186
Tab. 6.21 Studiu de caz 1.B: Analiza tehnico-economică 1	188
Tab. 6.22 Studiu de caz 1.B: Analiza tehnico-economică 2	188
Tab. 6.23 Studiu de caz 1.B: Analiză tehnico-economică 3	189
Tab. 6.24 Studiu de caz 1.B: Indicatori economici.....	189
Tab. 6.25 Cuantificare economii de energie și financiare totale pe pachetul de măsuri global în clădirea 1.B	189
Tab. 6.26 Studiu de caz 2: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea reală	196
Tab. 6.27 Studiu de caz 2: Indicatori economici	204
Tab. 6.28 Studiu de caz 2: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea NZEB.....	205

LISTA DE ABREVIERI ȘI NOTAȚII

Simbol	Mărime	Unitate de măsură
a	Difuzivitatea termică	m ² /s
c	Capacitatea calorică masică la presiune constantă	J/(kg·K)
d _t	Grosimea echivalentă a planșeului pe sol	m
f	Fracțiunea componentelor	-
h	Înălțime/ Adâncime	m
l	Lungime	m
q	Densitate de flux	W/m ²
t	Durata sezonului de încălzire	h
tep	Tone echivalent petrol	-
v	Viteza aerului adiacent suprafeței exterioare	m/s
z	Adâncime sol	m
Al	Aluminiu	-
A _{z=0}	Amplitudinea temperaturii la suprafața solului	°C
B	Dimensiune caracteristică a planșeului	m
H	Coeficient de pierderi termice	W/K
L	Dimensiunea plăcii	m
P	Perimetrul	m
Q	Cantitate de căldură	kWh
R	Rezistența termică unidirecțională	(m ² K)/W
R'	Rezistența termică corectată	(m ² K)/W
S	Suprafața planșeului	m ²
T	Temperatura	°C
U	Transmitanța termică	W/(m ² K)
V	Volum	m ³
α	Coeficient de transfer termic superficial	W/(m ² K)
δ	Grosimea peretelui	m
ε	Emisivitatea	-
θ	Temperatura	°C
λ	Conductivitate termică	W/(mK)
ρ	Densitate aparentă	kg/m ³
σ	Constanta Stefan-Boltzmann	W/(m ² K ⁴)
τ	Timp	h
ΔT	Diferență de temperatură între T _i și T _e	K
ΔT _{sol}	Diferență de temperatură între T _i și T _{sol}	K
Φ	Flux termic integrat pe suprafață	W

Se face precizarea că majoritatea denumirilor sunt cele aplicabile în SR EN 10211:2017 [1], SR EN 13370:2017 [2], C107/5-2005 [3], MC001-2006 [4], respectiv cele aplicabile în general pentru acest domeniu. Totuși, pentru a da un caracter unitar acestui material și pentru că unele notații au altă semnificație în reglementări tehnice diferite, unele denumiri au fost modificate, cu păstrarea aceleași denumiri până la sfârșitul materialului.

INDICI

a	aer
c	convecție
cer	cer
e	exterior
i	interior
per	perete
r	radiație
s	solid
se	suprafață exterioară
si	suprafață interioară
sol	sol
w	apă

ACRONIME

AI	Artificial Intelligence/Inteligență Artificială
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers/ Societatea Americană a Inginerilor în Încălzire, Refrigerare și Aer Condiționat
BCA	Beton Celular autoclavizat
CPE	Certificat de Performanță Energetică
CTS	Cota Terenului Sistemizat
DALI	Documentația pentru Autorizarea Lucrărilor de Intervenție
DOE	The United States of America Department of Energy/Departamentul de Energie al Statelor Unite ale Americii
EPDM	Ethylene-Propylene-Diene-Monomer/Etilen-Propilen-Dien Monomer, cauciuc sintetic
EPS	Expanded Polystyrene/Polistiren Expandat
ESEER	European Seasonal Energy Efficiency/Eficiența energetică sezonieră europeană la echipamente de răcire
HPL	High Pressure Laminate/Laminat obținut la presiune înaltă
HDPE	High-Density Polyethylene/Polietilenă de Înaltă Densitate
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning/Încălzire, Ventilare, Aer Condiționat
IPLV	Integrated Part Load Value/Eficiența Energetică Sezonieră la echipamente de răcire - caracteristică sectorului nerezidențial de clădiri
MEF	Metoda Elementului Finit
NZEB	Nearly Zero Energy Building/Clădire al cărei consum de energie este aproape egal cu zero
PUR	Polyurethane/Poliuretan
RNA	Rețele Neuronale Artificiale
SRE	Surse Regenerabile de Energie
XPS	Extruded Polystyrene/Polistiren Extrudat

Capitol 1 Introducere

1.1 Contextul actual privind tema eficienței energetice în clădiri

La nivel global, contextul legal privind tema eficienței energetice s-a creat prin Protocolul de la Kyoto, adoptat în 1997 în cadrul celei de-a 3-a Conferințe a Părților (COP3), care a intrat în vigoare în 2005, prin care 37 de țări și-au asumat angajamentul reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră, printre care cel mai abundent fiind dioxidul de carbon (CO₂), care este în continuă creștere (vezi Fig. 1.1). Ca și o consecință a schimbărilor climatice evidente, interesul asupra subiectului a crescut, astfel că în 2015 în cadrul COP21 a fost negociat Acordul de la Paris, prin care Părțile (țările membre ale Convenției Cadru a Națiunilor Unite Privind Schimbările Climatice – UNFCCC) au ajuns la un consens, în sensul că se vor face eforturi pentru a limita creșterea temperaturii globale sub 2°C față de nivelurile preindustriale, iar eforturile vor fi continuate cu scopul ca această limită să fie chiar de 1.5°C. La nivelul anului 2018, Acordul este ratificat de către 181 de țări dintre cele 197 care l-au semnat [5].

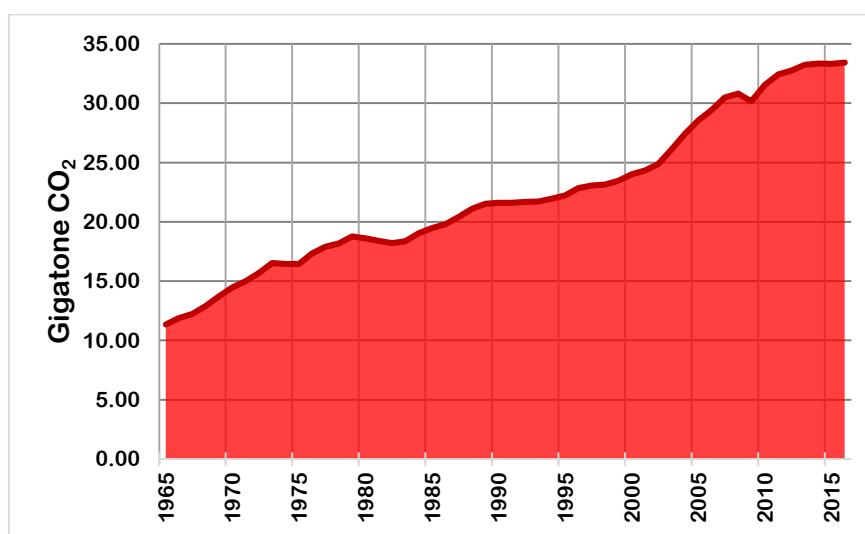


Fig. 1.1 Emisii globale de CO₂ în perioada 1965-2016 (pe baza datelor statistice din [6])

La nivel național, distribuția consumului de energie finală pe sectoare, a cărei producție cauzează emisii de CO₂, conform Fig. 1.2 indică o ușoară reducere a ritmului de creștere în ultimii ani, care este corelată de altfel cu trendul global. Un salt semnificativ de reducere a consumurilor de energie se observă în industrie, însă această reducere de 38.7%, aferentă perioadei 2005-2015, trebuie corelată cu inițiativele legate de economisirea energiei prin optimizarea proceselor tehnologice și a echipamentelor în primul rând, și doar apoi atribuit clădirilor în interiorul cărora se desfășoară activitățile, deoarece consumul acestora reprezintă doar o pondere din consumurile energetice din industrie. Trendul este unul descendent, însă consumurile energetice datorate industriei rămân în continuare printre cele mai mari.

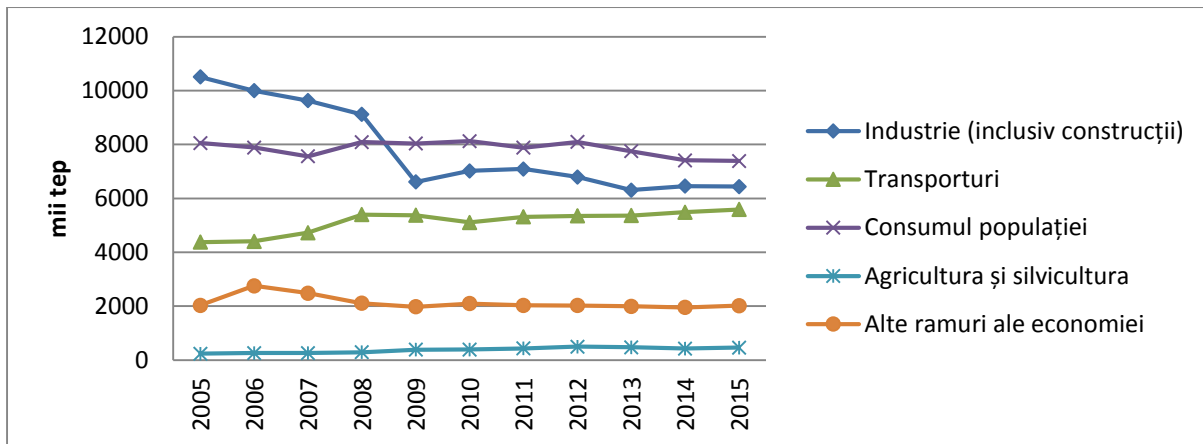


Fig. 1.2 Consum de energie finală pe sectoare în România (pe baza datelor statistice din [7])

Circa 36% din consumul de energie finală, respectiv aproape 40% din emisiile de CO₂ la nivel mondial îl reprezintă construcțiile și sectorul construcțiilor [8], fiind un consumator major, astfel că tema performanței energetice în acest sector este de mare actualitate, reprezentând interes pentru un cerc larg de specialiști din domeniul tehnic.

La nivelul sectorului construcțiilor, clădirile cu altă destinație decât cea de locuit reprezintă o provocare în sensul eficientizării energetice dintr-o perspectivă globală, atât prin prisma diversității soluțiilor constructive, cât și a cerințelor de confort specifice corelate cu destinația clădirii.

Un tip particular de clădiri din sectorul nerezidențial, puțin studiat din perspectiva performanței energetice, până în momentul de față, îl reprezintă clădirile care deservește activitățile din domeniul industrial. Opțiunea halelor, ca soluție arhitecturală și structurală, care pot avea o diversitate mare de funcțiuni, ridică problema creșterii performanței energetice în exploatare; a reducerii consumurilor de energie încă din faza de proiect, pentru clădirile noi, respectiv a identificării celor mai bune soluții tehnice de renovare majoră pentru fostele site-uri industriale, inclusiv cu posibilitatea schimbării destinației, astfel încât să fie aduse la cerințele actuale de consum redus de energie impuse de Comunitatea Europeană. În prezent, soluțiile constructive cele mai des folosite pentru aceste clădiri sunt structurile metalice.

Se identifică câteva aspecte problematice referitoare la evaluarea performanțelor termice ale acestor tipuri de clădiri:

- La clădirile noi – în prezent, au închiderile cu preponderență din panouri compozite termoizolate cu înveliș metalic, analize calitative și cantitative sub forma unor valori sintetice, de tipul coeficienților liniari de transfer termic, ale pierderilor termice suplimentare cauzate de punțile termice geometrice și de material la nivel de detalii constructive nefiind disponibile în reglementările tehnice naționale, nici în literatura de specialitate la nivel internațional;
- La clădirile existente propuse pentru modernizare - detaliile de execuție optimizate, care să asigure un instrument facil de lucru pentru auditorii energetici, iar ulterior pentru proiectanți, nu se regăsesc în normativele energetice din țara noastră;
- Nu există cercetări științifice care să trateze probleme specifice acestor tipuri de clădiri, cum ar fi transferul de flux termic la plăci pe sol de dimensiuni mari pe perioade îndelungate de timp.

În contextul mondial de economie de energie, devine firească atenția reducerii consumului de energie pentru acest tip de clădiri.

Subsecvent Protocolului de la Kyoto și Acordului de la Paris, ca urmare a obligațiilor asumate, în ultimii ani a apărut un nou concept de proiectare al clădirilor: NZEB (Nearly Zero Energy Buildings). Dacă în ceea ce privește proiectarea clădirilor noi, un asemenea demers de proiectare poate beneficia încă din faza de concept de anumite măsuri pasive: proiectare optimizată în funcție de orientarea clădirii față de punctele cardinale, raport optim arie anvelopă – volum încălzit, procent de suprafețe vitrate care să avantajeze economia de energie, devine o provocare transformarea unei clădiri existente din sectorul nerezidențial într-o clădire al cărei consum de energie este aproape egal cu zero, ținând cont de limitări de amplasament (amplasare în spații centrale ale comunităților, restrânse și umbrite), sistem constructiv, vechime (coroborată cu lipsa unor cerințe minime normate privind eficiența energetică la momentul execuției clădirii), etc.

De altfel, dacă revenim la Fig. 1.2, se poate observa că o ușoară pantă descendentă a consumurilor a fost înregistrată abia în ultimii 4 - 5 ani analizați, iar în ceea ce privește “saltul” în reducerea consumului energetic care s-a produs în industrie la nivelul anilor 2008 – 2009 acesta este preponderent datorat optimizării proceselor tehnologice. Având în vedere fondul mare de clădiri construit, este evident că o reducere semnificativă a emisiilor de CO₂ se va putea realiza prin modernizarea complexă a unui procent semnificativ din acest fond existent. Se identifică aspectul că un „salt” similar s-ar putea produce ca urmare a unei modernizări energetice de masă în conceptul NZEB a acestui fond.

Motivația actualei cercetări vine pe fondul cunoștințelor limitate în acest domeniu, respectiv datorită exprimării dezacordului utilizării metodelor simplificate de calcul, care încă se utilizează în mod curent în această specialitate (de regulă, modele analitice), nici într-un caz mai puțin important decât alte specializări în inginerie civilă, mai ales că deja se prefigurează importanța tot mai mare pe care acesta o va avea în viitor. Totodată, cercetarea întreprinsă reprezintă exprimarea unei curiozități științifice personale care s-a profilat la nivelul anului trei de facultate, când am avut primul contact cu acest domeniu.

1.2 Obiectivele cercetării

Teza de doctorat “Analiza performanței energetice a clădirilor nerezidențiale prin tehnici de modelare numerică și Inteligență Artificială aplicată” se înscrie în preocupările actuale de eficientizare energetică a clădirilor. De asemenea, tema de cercetare se înscrie în preocuparea specialiștilor din domeniu privind optimizarea metodologiei de calcul pentru evaluarea performanței energetice a clădirilor cu altă destinație decât cea de locuit.

Studiile întreprinse în această teză vizează aducerea de contribuții teoretice și aplicative privind studiul și evaluarea performanței energetice a clădirilor din sectorul nerezidențial, sintetizate mai jos:

- *contribuții aplicative* privind evaluarea performanței termice a panourilor compozite termoizolate cu înveliș metalic, ca soluție de închidere în special la clădirile industriale;
- *contribuții teoretice* privind transferul de căldură la plăci pe sol de dimensiuni mari;
- *contribuții teoretice* prin introducerea unor tehnici noi, de Inteligență Artificială, ca metodă de cercetare în ingineria civilă;
- *contribuții aplicative* privind implementarea conceptului de proiectare NZEB în clădiri existente din sectorul nerezidențial, în vederea aducerii unor contribuții metodologice, respectiv pentru promovarea acestui tip de proiectare energetică având în vedere iminența implementării lui la scară largă în următorii ani.

În această teză de doctorat se urmărește atingerea următoarelor trei obiective principale:

Primul obiectiv propune efectuarea unui studiu privind proiectarea energetică a clădirilor nerezidențiale, cu accent asupra clădirilor industriale. Principalele direcții pentru realizarea primului obiectiv sunt:

- Identificarea cadrului legislativ la nivel național și internațional;
- Studiul bibliografic al cadrului normativ la nivel național și internațional: normative tehnice în vigoare, standarde, euro-norme, ghiduri de bune practici, etc.;
- Prezentarea sintetică a unor tipuri de metode de calcul utilizate în mod curent în proiectarea energetică a construcțiilor;
- Identificarea stadiului cercetărilor privind soluțiile constructive de închidere utilizate în cazul halelor industriale;
- Studiul unor construcții industriale realizate și a soluțiilor utilizate.

Al doilea obiectiv, prin studiul și analiza unor detalii constructive sau părți de clădire specifice exclusiv clădirilor nerezidențiale, utilizând metode de calcul avansate și inovative (metode numerice pentru cazurile bidimensional și tridimensional – Metoda Elementului Finit, și Inteligență Artificială – Rețele Neuronale Artificiale), are ca scop îmbunătățirea cunoașterii actuale a unor subiecte pentru care nu există cercetare științifică la ora actuală. Principalele direcții de studiu în atingerea celui de-al doilea obiectiv sunt:

- Evaluarea performanței termice a panourilor compozite termoizolate cu înveliș metalic, cu metode avansate de calcul (analize numerice în regim termic staționar pe modele geometrice bidimensionale), la nivel de analiză de detalii de îmbinări între elementele anvelopei (de ex. în zonele de intersecție ale panourilor: la soclu, cu tâmplăria, la atic, la coamă, etc.), cu elaborarea unui catalog de punți termice pentru acest tip de soluție constructivă. Pe baza rezultatelor obținute se vor elabora detalii constructive optimizate din punct de vedere energetic pentru elementele anvelopei clădirii.
- Elaborarea unor studii comprehensive privind transferul de flux termic la plăci pe sol de dimensiuni mari (analiză pe părți de clădire) cu metode numerice, atât în regim staționar, cât și în regim nestaționar (pentru perioade îndelungate de timp), pe modele geometrice tridimensionale, și cu utilizarea teoriei similitudinii, care să permită identificarea unor

fenomene specifice. Se efectuează comparația rezultatelor obținute cu metode numerice cu rezultate obținute prin relații analitice.

Al treilea obiectiv este de a aduce contribuții privind metodologia de evaluare a performanței energetice a clădirilor nerezidențiale prin:

- Contribuții privind modul de evaluare al pierderilor de căldură ale clădirii, ca parte componentă în bilanțul termic efectuat pentru determinarea necesarului de încălzire, prin elaborarea unor aplicații de Inteligență Artificială care să deschidă noi perspective de abordare a acestui domeniu din ingineria civilă;
- Elaborarea a trei studii de caz, pentru două tipuri de clădiri din sectorul nerezidențial cu destinația: hotel și spital, în vederea transformării acestora în clădiri al căror consum de energie aproape egal cu zero, cu evidențierea unor probleme specifice, cu propunerea de soluții punctuale, cu realizarea analizelor financiare, respectiv cu identificarea unor caracteristici specifice conceptului de proiectare NZEB (Nearly Zero Energy Building), în vederea aplicabilității la scară largă a acestuia.

1.3 Structura tezei de doctorat

Teza cuprinde șapte capitole, unde cap. 1 reprezintă introducerea, cap. 2 ÷ cap. 6, reprezintă conținutul, rezultatele și concluziile care converg din subiectele cercetate, iar cap. 7 face o sinteză a concluziilor generale ale acestei teze de doctorat și a contribuțiilor originale, trasându-se totodată și direcțiile viitoare de cercetare. Conținutul capitolelor este prezentat sintetic în paragrafele următoare.

Capitol 1 – Introducere, prezentarea temei generale de cercetare în contextul mondial privitor la economia de energie în clădiri, cu introducerea subiectelor de interes în preocupările actuale ale specialiștilor din domeniu. De asemenea, sunt prezentate obiectivele cercetării, respectiv conținutul succint al capitolelor tezei.

Capitol 2 – Studiu privind proiectarea energetică a clădirilor nerezidențiale, prezintă un studiu bibliografic al cadrului legislativ și al cadrului normativ aplicabile actual, la nivel național și internațional. Un al doilea studiu în acest capitol prezintă tipuri de metode de calcul utilizate în proiectarea energetică a construcțiilor. Se efectuează un studiu al stadiului cercetărilor privind soluțiile constructive utilizate actual la hale industriale, la nivel național și internațional, respectiv un ultim studiu care vizează domeniul clădirilor industriale, cu inventarierea unor detalii constructive utilizate actual la închiderile halelor.

Capitol 3 – Evaluarea performanței termice a panourilor compozite termoizolate cu înveliș metalic prin analiză numerică, propune un studiu care evaluează influența punților termice, cu determinarea numerică a coeficienților liniari de transfer termic, pentru principalele detalii constructive care alcătuiesc ansamblul unei hale industriale uzuale, utilizând metode numerice (Metoda Elementului Finit) de determinare a transferului de flux termic, în regim termic staționar, calcul bidimensional, utilizând programul THERM. Pe baza cercetării aplicative efectuate, se identifică detaliile problematice și se propun detalii constructive

optimizate din punct de vedere energetic pentru elementele anvelopei. În final, rezultatele obținute la nivel de detaliu constructiv se integrează în studii la nivel de element de anvelopă al clădirii. Conținutul acestui capitol reprezintă un catalog de punți termice.

Capitol 4 – Studiul comprehensiv al transferului de căldura la plăci pe sol de dimensiuni mari prin utilizarea metodelor numerice. Cuprinde studii comprehensive privind calculul unei zone puțin studiate în termotehnica construcțiilor: transferul de flux termic la plăci pe sol de dimensiuni mari pe durate lungi de timp, cu metode numerice (Metoda Elementului Finit), în regim termic staționar și nestaționar, pe modele geometrice tridimensionale, cu ajutorul programului COMSOL, prin utilizarea teoriei similitudinii, cu propunerea unui model “simil” care se pretează la analizele numerice în regim nestaționar. Rezultatele numerice se compară cu rezultate obținute prin relații analitice.

Capitol 5 – Aplicarea tehnicilor de Inteligență Artificială în studiul transferului de căldură la plăci pe sol de dimensiuni mari. Propune două aplicații în inginerie civilă utilizând Inteligența Artificială. Astfel, se propune o metodă hibridă, de tip “grey box”, care permite optimizarea / reducerea timpului necesar studiului numeric de lungă durată prin predicționarea valorilor de flux termic cu pas orar pe perioade mari de timp. Rezolvarea numerică a ecuațiilor termo-dinamice pentru perioade lungi de timp investigate este substituită printr-o aplicație de AI. Se propune o a doua metodă AI, de tip “black box”, care să permită predicționarea răspunsului termic al unei părți de clădire pentru orice dimensiune, pe baza învățării răspunsurilor la o serie de dimensiuni distincte de plăci pe sol (30x30 m, 50x50 m, 70x70 m, 100x100 m) obținute cu ajutorul modelului simil propus în cap. 4.

Capitol 6 – Studii de caz de implementare concept NZEB în fondul construit nerezidențial. În acest capitol s-au elaborat studii de caz, ca urmare a participării într-un proiect internațional, proiectul neZEH și care, printr-o analiză energetică complexă: la nivel de detaliu constructiv - analiză de punți termice cu metode numerice a tuturor detaliilor constructive, respectiv la nivel de clădire: calcul multizonal, calcul cu intermitență, propune soluții care permit transformarea a două hoteluri în NZEB (Nearly Zero Energy Buildings). De asemenea, s-a efectuat un studiu de caz pentru un spital existent, de interes județean cu pacienți internați, care este analizat cu metode complexe, multidisciplinar, și care propune soluții tehnice integrate pentru: anvelopa clădirii, instalații și surse regenerabile de energie, care permit transformarea clădirii în NZEB, inclusiv cu analize financiare.

Capitol 7 – Concluzii, contribuții, diseminarea rezultatelor și direcții de cercetare, cuprinde concluziile care rezultă din studiile elaborate în cadrul acestei teze de doctorat, cu evidențierea contribuțiilor personale, respectiv cu prezentarea diseminării rezultatelor obținute în cercetările întreprinse. Totodată, centralizarea concluziilor facilitează identificarea și trasarea direcțiilor viitoare de cercetare.

Capitol 2 Studiu privind proiectarea energetică a clădirilor nerezidențiale

2.1 Studiu bibliografic al cadrului legislativ și al cadrului normativ aplicabil

2.1.1 Cadrul legislativ european și american

La ora actuală, la nivelul Uniunii Europene 40% din energia finală este consumată în clădiri [9]. La nivel global, statistici recente ale Agenției Internaționale a Energiei (IEA), au determinat că 30% din consumul global de energie îl reprezintă sectorul rezidențial și comercial, iar cei mai mari consumatori ai acestor sectoare sunt clădirile, însă cel mai mare consumator mondial de energie este industria – vezi Fig. 2.1.

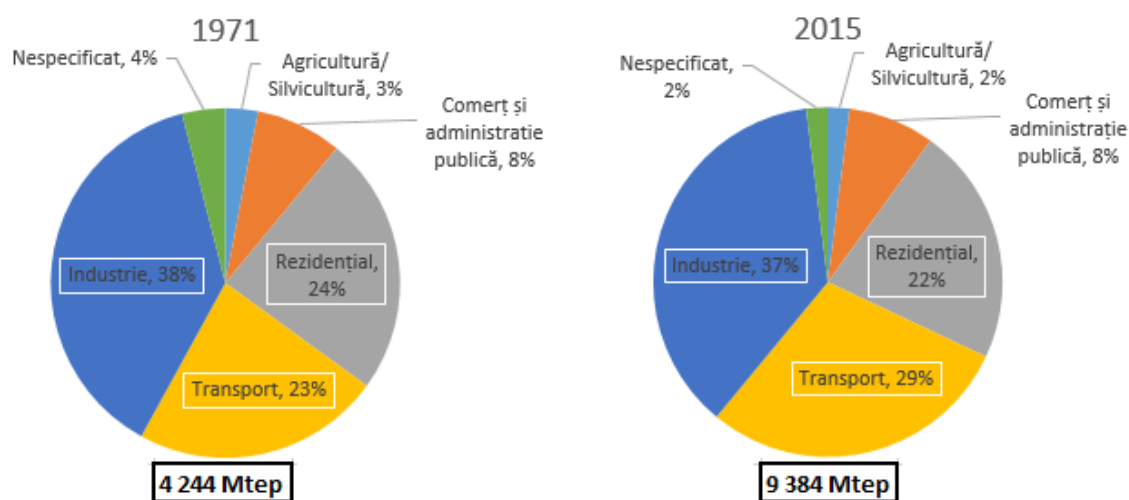


Fig. 2.1 Consumul de energie în diferite sectoare la nivel global [10]

Așa cum este deja cunoscut, problema combaterii schimbărilor climatice s-a pus la nivel mondial prin Summit-ul de la Rio din 1992, unde prin “Convenția de la Rio” s-a adoptat Convenția Cadru a Națiunilor Unite privind Schimbările Climatice (UNFCCC), care a intrat în vigoare în 1994. Pentru a se asigura implementarea și revizuirea convenției, anual se organizează Conferința Părților (COP). În cadrul conferinței COP3 din anul 1997 a fost adoptat Protocolul de la Kyoto, care a intrat în vigoare în 16 februarie 2005, prin care un număr de 37 țări s-au angajat în luarea de măsuri privind diminuarea emisiilor de gaze cu efect de seră [5].

În 2015 a avut loc Conferința COP21 sau CMP11 (a 11-a sesiune a Conferinței părților (CMP) din Protocolul de la Kyoto din 1997). În cadrul conferinței s-a negociat Acordul de la Paris, un acord global privind reducerea schimbărilor climatice, textul căruia a reprezentat un consens între 196 de țări care au participat la acesta. Mai exact, s-a stabilit un obiectiv de limitare a încălzirii globale la "cu mult sub 2°C" față de nivelurile preindustriale. Acordul cere ca emisiile de gaze cu efect de seră să fie atinse în ultima jumătate a secolului XXI. În versiunea

adoptată a Acordului de la Paris, părțile și-au asumat continuarea eforturilor de limitare a măririi temperaturii la valoarea de 1.5°C. Pentru a se putea atinge obiectivul de 1.5°C sunt necesare emisii de CO₂ zero, la care ar trebui să se ajungă între 2030 și 2050, potrivit unor cercetători [11]. Una dintre măsurile necesare pentru reducerea emisiilor cu efect de seră este reducerea consumului de energie primară.

La nivel de Comunitate Europeană, acest angajament s-a transpus prin adoptarea unor Directive, dintre care, cu relevanță în sectorul construcțiilor, este Directiva nr. 2002/91/CE, Directiva Performanței Energetice a Clădirilor (EPDB), care are ca obiective: stabilirea unei metodologii comune de evaluare a performanței energetice pentru clădiri, utilizarea unor standarde minime de performanță energetică atât pentru clădirile nou construite, cât și pentru clădirile existente, scheme de certificare pentru clădiri noi și anumite clădiri existente, certificare energetică pentru clădirile noi și cele existente, precum și inspecții specifice și revizia cazanelor și a instalațiilor termice [12]. Această directivă a fost abrogată în 31.01.2012, prin Directiva 2010/31/UE.

În 2006 se adoptă Directiva 2006/32/CE care susține îmbunătățirea eficienței energetice la consumatorii finali, una dintre măsurile propuse fiind auditul energetic la “toți consumatorii finali, inclusiv consumatorii casnici și comerciali mici și *consumatorii industriali mari și mici*” [13]. Aceasta a fost abrogată în 04.06.2014, prin Directiva 2012/27/UE.

În 2010 se adoptă o reformă a EPDB, Directiva 2010/31/UE, în care se merge mai departe cu provocările pentru țările membre ale Uniunii Europene, având ca obiective: clădiri noi cu consum de energie aproape zero până în anul 2020 (2018 pentru clădiri administrative), precum și aplicarea unei metodologii care printr-un cost optimal să permită realizarea unor cerințe minime atât pentru anvelopa clădirilor cât și pentru sistemele tehnice [14].

Ulterior se elaborează Directiva 2012/27/UE a Parlamentului European și a Consiliului, care vizează îmbunătățirea performanței energetice a parcului imobiliar, care cuprinde atât sectorul rezidențial, cât și cel comercial, o atenție sporită fiind acordată clădirilor administrative [9].

În 19.06.2018 a intrat în vigoare Directiva 2018/844/UE a Parlamentului European și a Consiliului, care modifică Directiva 2010/31/UE și Directiva 2012/27/UE, în care este introdusă obligativitatea stabilirii unei strategii de renovare pe termen lung pentru fiecare stat membru pentru “a sprijini *renovarea parcului național de clădiri rezidențiale și nerezidențiale, atât publice, cât și private, într-un parc imobiliar cu nivel ridicat de eficiență energetică și decarbonizat până 2050*, facilitând transformarea eficace din punct de vedere al costurilor a *clădirilor existente* în clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero”. Practic, transpunerea la nivel național a acestei Directive va obliga România să sprijine eficientizarea energetică a întregului fond de clădiri existent. De altfel, prin această Directivă este atins punctul critic al acestui subiect și prefigurează atingerea unui apogeu al măsurilor luate cu privire la creșterea eficienței energetice a clădirilor pe plan european.

În SUA, prima lege din domeniul eficienței energetice a fost adoptată în anul 1975 și venea ca urmare a crizei petrolului din anul 1973. Una dintre cerințele acestei legi era reducerea necesarului de energie, și a cuprins “Programul de conservare a energiei pentru produse destinate consumatorilor”, care a dat Departamentului de Energie al SUA (DOE) “autoritatea

de dezvoltare, revizuire și punere în aplicare a standardelor minime de conservare a energiei pentru aparate și echipamente” [15].

Departamentul pentru Energie al SUA (DOE) se implică în elaborarea normativelor privind eficiența energetică a clădirilor, dar normativele sunt elaborate de organizații private. Consiliul Codului Internațional (ICC) elaborează Codul Internațional al Conservării Energiei (IECC), iar Asociația Americană a Inginerilor privind Încălzirea, Refrigerarea și Climatizarea, Inc. elaborează reglementările tehnice ASHRAE. DOE participă la modernizarea și verificarea codurilor model, care ulterior sunt preluate de fiecare stat american, iar prescripțiile tehnice și metodologiile de calcul prezentate în codurile model sunt adoptate în normative [16].

Prin Ordinul Executiv 13514 din octombrie 2009, președintele american Barack Obama a mandatat ca până în anul 2015 să se reabiliteze 15% din fondul existent al clădirilor administrative federale americane, iar până la nivelul anului 2030 toate imobilele federale noi să fie cu consum de energie zero [17]. Acest Ordin a fost înlocuit în martie 2015 cu Ordinul Executiv 13693, în care se impune reducerea cu 40% a nivelului emisiilor de gaze cu efect de seră pentru clădirile federale până în 2025 (față de anul de referință 2008). De asemenea, acest Ordin mai prevede ca din totalul energiei (termice și electrice) utilizate de către clădirile federale, 25% să fie asigurat din surse regenerabile după anul 2025, însă această prevedere a intrat în vigoare în 2016 și implică o creștere graduală a acestui procent, care începe de la 10% pentru anii 2016-2017. Se mai prevede că toate clădirile federale noi cu suprafața mai mare de 465 m² (5000 ft²) și a căror proiectare începe în 2020 trebuie să fie proiectate și executate ca și clădiri cu consum de energie zero [18]. Însă, în mai 2018 acest Ordin a fost revocat de către președintele Donald Trump, fiind înlocuit cu Ordinul Executiv 13834 [19], prin care solicită agențiilor federale să respecte cerințele legale legate de performanța energetică și de mediu "într-o manieră care crește eficiența, optimizează performanța, elimină utilizarea inutilă a resurselor și protejează mediul".

2.1.2 Cadrul legislativ național

La nivel de legislație românească, Legea 372/2005 a transpus în legislația națională prevederile Directivei nr. 2002/91/CE a Parlamentului European și a Consiliului privind performanța energetică a clădirilor. Legea impune obligativitatea efectuării certificatului de performanță energetică pentru imobilele consumatoare de energie, pentru cele nou construite și pentru cele care urmează să fie vândute sau închiriate, astfel încât potențialul cumpărător sau chiriaș să obțină un instrument de informare asupra profilului de consum energetic ale clădirii [20].

În mai 2013 s-a elaborat o nouă lege, Legea 159/2013, care reprezintă o completare și modifică Legea 372/2005 privind performanța energetică a clădirilor. Astfel, la clădirile noi, obligativitatea certificatului energetic este impusă în faza de recepție a clădirii, fără certificat, procesul verbal de recepție fiind considerat nul [21].

Ordonanța nr. 13/2016 este cea mai recentă modificare și completare a Legii 372/2005, iar în ea este definită clădirea al cărei consum este aproape egal cu zero (NZEB), ca și "clădirea al cărei consum de energie este aproape egal cu zero - clădire cu o performanță energetică foarte ridicată, la care consumul de energie este aproape egal cu zero sau este foarte scăzut și

este acoperit, în proporție de minimum 10%, cu energie din surse regenerabile, inclusiv cu energie din surse regenerabile produsă la fața locului sau în apropiere” [22]. De altfel, este pentru prima dată în context legislativ național când este impusă o valoare minimă pentru procentul de energie care trebuie asigurat din surse regenerabile.

Așadar, se pot observa demersurile legislative la nivel internațional și național, care reprezintă o preocupare constantă în ultimii ani și iau o amploare tot mai mare, urmând ca cel mai probabil în următorii ani să devină o prioritate la nivel mondial.

2.1.3 Studiul bibliografic al cadrului normativ european și american

Primele cerințe de izolare cu valori minime impuse pentru valorile coeficientului de transfer termic U , respectiv valori maxime pentru rezistența termică R , în cadrul unor normative, datează din anii ‘60 și au apărut în țările scandinave. Mai exact, în Danemarca, în anul 1961, a apărut primul normativ care reglementa consumul de energie în clădiri [16].

În prezent, la clădirile de locuințe sunt cele mai multe reglementări, însă prezentul studiu propune urmărirea evoluției normativelor de proiectare energetică în ceea ce privește clădirile cu alte funcțiuni decât cea de locuit, la nivel național și internațional.

Astfel, la nivel european s-au luat măsuri privind reglementarea consumului de energie la clădirile industriale încă din anii ‘70-‘80 [23]. În Tab. 2.1 și în Tab. 2.2 sunt redate reglementările impuse privitor la rezistența termică minimă în elementele anvelopei, precum și procentele maxime de suprafețe vitrate.

Tab. 2.1 Cerințe minime de performanță termică în țările europene la nivelul anilor ‘70-‘80

Tip cerințe pentru:		$R_{m,min} [(m^2 K)/W]$			Procent de suprafețe vitrate maxim [%]	
Țara	Elem.	Pereți	Planșeu	Acoperiș	Pereți	Acoperiș
Scotia		1.45	1.45	1.45	15	20
Germania		Tab. 2.2	Tab. 2.2	Tab. 2.2	30	---
Cehoslovacia		0.75	---	2	30	---

Tab. 2.2 Cerințe de performanță termică în Germania la nivelul anilor ‘80

Elementul de construcție	$R_{m,min} [(m^2K)/W]^*$					
$T_i - T_e [K]$	20	25	30	35	40	45
Pereți exteriori	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60
Acoperișuri	1.15	1.45	1.75	2.1	2.40	2.70

*conform TGL 35424/1981 - Termoizolația în tehnica construcțiilor (valorile se referă la suprafețe, exclusiv elementele de închidere a golurilor)

În Germania, în februarie 2002, în urma implementării Legii conservării energiei, s-a adoptat *Regulamentul german de conservare a energiei "Energieeinsparverordnung (EnEV)"* care impune cerințe privind performanțele energetice ale anvelopei clădirilor, precum și a

sistemelor tehnice pentru încălzire, apă caldă și ventilație. Regulamentul a fost modificat și completat succesiv (variante actuală este *Regulamentul german de conservare a energiei 2014*), iar în 1 ianuarie 2016 au intrat în vigoare cerințe sporite [24]. Pentru sectorul nerezidențial, prevederile acestui regulament se aplică defalcat, la clădiri cu o temperatură interioară mai mare de 19°C – clădiri de birouri, școli, spitale, etc, respectiv la clădiri cu o temperatură interioară redusă, mai mare de 12°C – majoritatea halelor și clădirilor industriale. Cerințele din reglementarea tehnică se referă la:

- limitarea pierderilor prin transmisie pentru a se asigura calitatea de izolare a anvelopei clădirii;
- etanșeitatea anvelopei clădirii;
- prevederea unor cerințe minime de performanță termică și punți termice în vederea asigurării unui confort termic suficient în timpul iernii, respectiv prevederea de cerințe de protecție termică de vară;
- cerințe privind echipamentele de încălzire, prepararea apei calde și ventilație.

Este prezentată o metodă pentru calculul consumului anual de energie primară, atât pentru clădirile cu o temperatură interioară normală (din sectorul rezidențial și nerezidențial), cât și pentru clădirile cu temperatura interioară mai mare decât 12°C (hale, clădiri industriale) [25].

În Germania, conform EnEv2008, valorile rezistenței termice pe tip de element de anvelopă pentru clădirile din sectorul terțiar sunt prezentate în Tab. 2.3.

Tab. 2.3 Cerințe de performanță termică în Germania, conform EnEv2008

Nr. crt.	Elemente anvelopă	Valori medii ale rezistenței la transfer termic [(m ² K)/W]	
		Zone cu temp. >19°C	Zone cu temp. între 12°C și 19°C
1	Elemente opace	2.85	2.00
2	Elemente vitrate (ferestre)	0.53	0.35
3	Pereți cortină	0.53	0.33
4	Acoperișuri de sticlă, luminatoare, cupole	0.32	0.32

Conform EnEv2014, valorile rezistenței termice pe tip de element de anvelopă pentru clădirile din sectorul terțiar sunt cele prezentate în Tab. 2.4. Se observă o delimitare clară între clădirile din sectorul terțiar cu temperaturi interioare normale, față de cele cu temperaturi interioare reduse (anumite clădiri industriale, zone secundare clădirilor comerciale, etc), precum și cerințe mai permissive pentru izolarea anvelopei clădirii pentru ultimele. Începând cu anul 2016 aceste valori s-au majorat cu un factor de 1.33 (la nivel de transmitanță termică factorul aplicat este de 0.75) [24].

Tab. 2.4 Cerințe de performanță termică în Germania, conform EnEV2014

Nr. crt.	Elemente anvelopă	Valori medii ale rezistenței la transfer termic [(m ² K)/W]	
		Zone cu temp. ≥19°C	Zone cu temp. între 12°C și 19°C
1	Pereți exteriori	3.57	2.85
2	Ferestre, uși vitrate	0.77	0.53
3	Pereți cortină	0.71	0.53
4	Acoperișuri de sticlă, luminatoare, cupole	0.37	0.37
5	Placa pe sol, perete pe sol, pereți și planșee spre spații neîncălzite	2.85	2.85
6	Uși de exterior	0.55	0.35

Începând cu EnEV2014 se propune elaborarea unui certificat energetic distinct pentru clădirile din sectorul nerezidențial. Acesta abordează mai complet aceste clădiri, existând posibilitatea să se calculeze necesarul de energie cu elaborarea *Certificatului pentru necesarul de energie* - obligatoriu la clădiri noi și unele modernizări, sau să se evalueze consumul de energie al clădirii cu elaborarea *Certificatului pentru consumul de energie*, raportat la suprafața încălzită utilă [26]. Necesarul de energie care se determină, reprezintă necesarul anual de energie primară pentru încălzire, apă caldă, iluminat, ventilație și răcire. Valorile se calculează prin evaluarea pierderilor prin elementele anvelopei clădirii și prin respectarea condițiilor standard de utilizare (ex. date standardizate ale climatului, comportamentul definit al utilizatorului, temperatura interioară de calcul și aporturi termice interioare). Valoarea calculată reprezintă un indicator pentru eficiența energetică a unei clădiri și a tehnologiei pentru instalații. Așa cum se poate observa în Fig. 2.2, necesarul de energie primară nu este încadrat în clase energetice, ci în anumite intervale de valori.

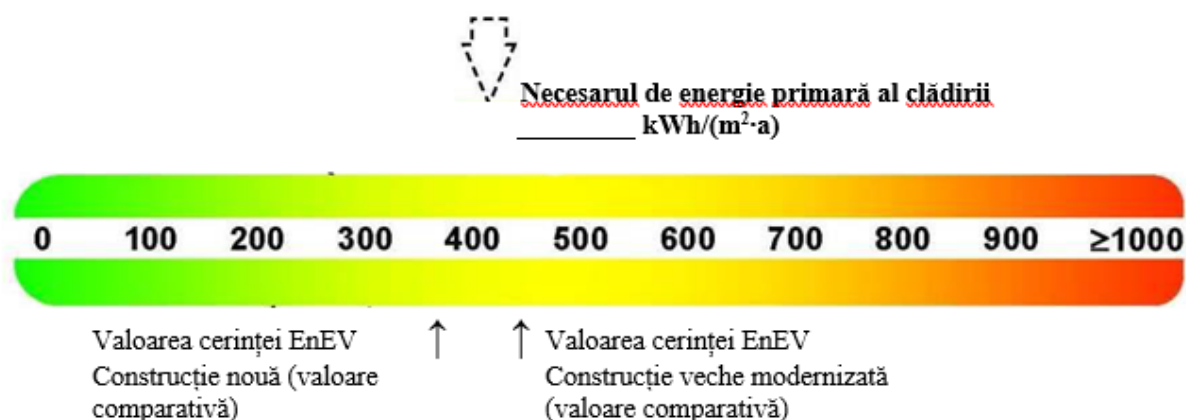


Fig. 2.2 Grila necesar de energie primară în certificarea energetică în Germania conform EnEV2014

Consumul de energie al clădirii este defalcat în consum de energie termică și consum de energie electrică – vezi Fig. 2.3. Informațiile despre consumul de energie termică și consumul de energie electrică se preiau din facturile de la furnizorii de energie. Valorile obținute devin valori specifice prin raportarea la aria utilă încălzită/răcită. Se subliniază ideea

că, consumul real de energie al clădirii poate diferi datorită comportamentului modificabil al utilizatorului.

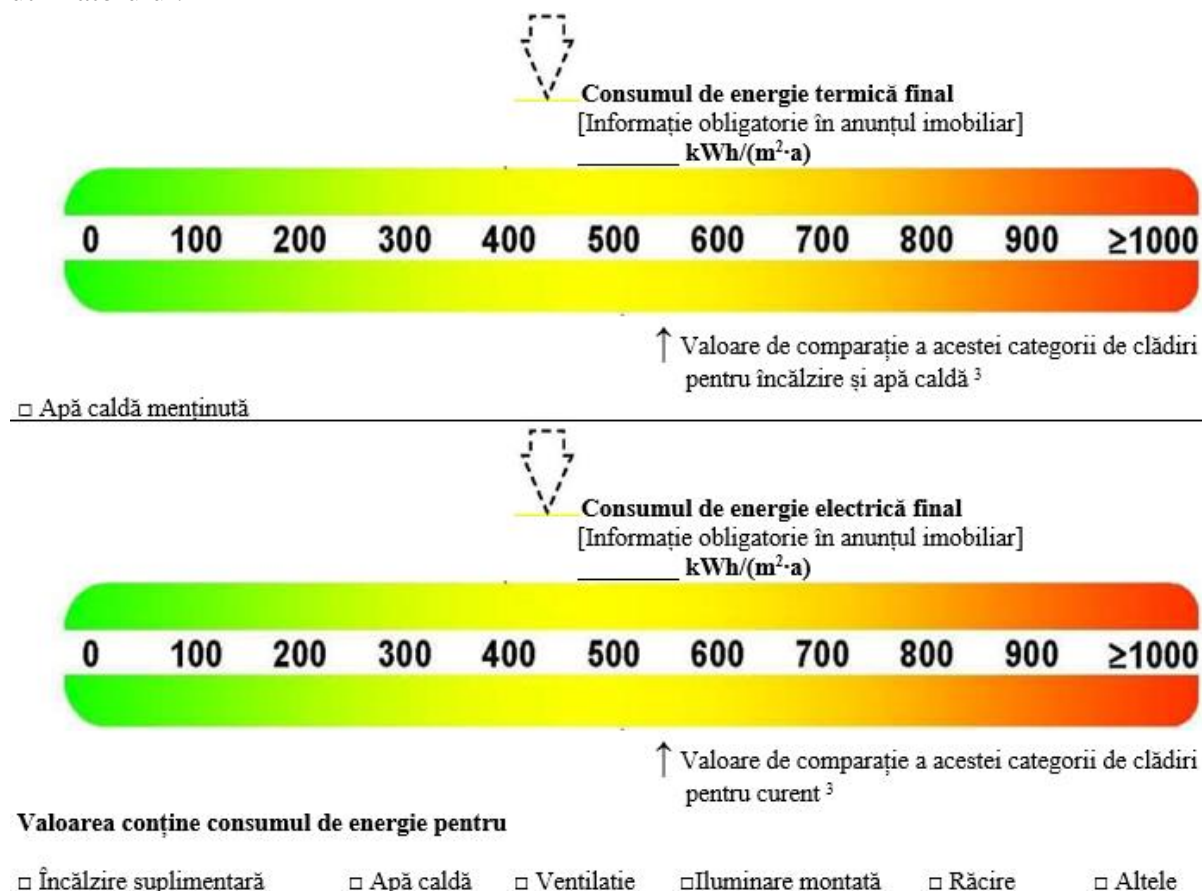


Fig. 2.3 Grile ale consumului de energie primară în certificarea energetică în Germania conform EnEv2014

Valorile comparative reies din aprecierea clădirilor asemănătoare. Valori de consum mai mici decât cele ale clădirii de referință indică o performanță energetică mai bună a clădirii analizate.

Consumul de energie primară, rezultă din consumul de energie finală determinat pentru clădire în total. La fel ca și necesarul de energie primară, acesta se determină cu ajutorul factorilor de conversie, ce iau în considerare “lanțul inițial” (explorare, extracție, distribuție, transformare) al purtătorului de energie utilizat (de ex. păcură, gaz, electricitate, energii regenerabile, etc.) [26].

Deși inițial reglementările tehnice și standardele în acest domeniu au fost elaborate și aplicate la nivel național, tendințele actuale converg înspre colaborarea internațională în dezvoltarea standardelor care reglementează cerințele specifice în vedea obținerii economiei de energie în exploatarea clădirilor. Astfel, în Europa, Directiva Europeană EPDB, așa cum s-a menționat mai sus, a impus statelor membre ale Uniunii Europene să stabilească cerințe privind economia de energie, susținută prin modificarea standardelor CEN care calculează performanța energetică a clădirilor și a standardelor ISO.

În Statele Unite ale Americii și Canada, se utilizează IECC (International Energy Conservation Code) și reglementări ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) [16].

Atât reglementările ASHRAE, cât și IECC sunt coduri model, destinate să fie adaptate la condițiile locale. Majoritatea statelor din SUA utilizează IECC pentru clădirile de locuit joase sau pentru clădiri de complexitate redusă, în timp ce ASHRAE se utilizează la clădirile mari și complexe sau la clădirile nerezidențiale. Reglementările elaborate de ASHRAE cuprind peste 150 de standarde, care conțin inclusiv metodologiile de calcul din domeniul eficienței energetice a clădirilor și a echipamentelor [27].

ASHRAE 90.1 – 2016, Standardul de energie pentru clădiri, exceptând clădirile joase de locuit

Acest standard este dezvoltat de către Societatea Americană a Inginerilor din domeniul Încălzirii, Refrigerării și Aer Condiționat. Se aplică clădirilor mari și complexe, în special din sectorul terțiar, dar sunt impuse cerințe minime tuturor tipurilor de clădiri, exceptând clădirile de locuit cu un număr mai mic de 4 etaje. Standardul ASHRAE conține anexe normative cu valori și metode de calcul.

În ceea ce privește anvelopa clădirii, valorile coeficienților U sau R ($1/U$), sunt date pentru 9 zone climatice generale, din care unele sunt partajate în A, B și C. Astfel, în SUA se utilizează în total 19 subzone, în timp ce în Canada, se utilizează 8 zone climatice. Cerințele minime de performanță termică, sub forma de valori maxime ale transmitanței termice, respectiv valori minime ale rezistenței la transfer termic sunt impuse pe tip de element de anvelopă, inclusiv pentru suprafețele vitrate. Totodată, sunt împărțite în valori pentru clădiri nerezidențiale, rezidențiale și clădiri semi-încălzite. Unele valori pentru pereți exteriori, planșee inferioare, planșee terasă, etc. depind de sistemul constructiv – oțel, beton armat, construcții din lemn, etc.

Valorile minime ale rezistenței termice pentru elementele anvelopei clădirilor din sectorul nerezidențial, respectiv clădirile semi-încălzite (majoritatea clădirilor industriale) sunt redată în Tab. 2.5 și Tab. 2.7, conform ASHRAE 90.1 2010, respectiv în Tab. 2.6 și Tab. 2.8, conform ASHRAE 90.1 2016. Se observă o creștere semnificativă a cerințelor de performanță termică în evoluția acestui standard pentru clădirile nerezidențiale, iar pentru clădirile semi-încălzite creșterea se produce în special pentru elementele de tip planșeu terasă sau de acoperiș.

Tab. 2.5 Valori minime ale rezistenței termice pentru clădiri din sectorul nerezidențial în SUA conform ASHRAE 90.1 - 2010

	R _{min} pentru clădiri nerezidențiale [(m ² K)/W]							
Zona climatică	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
<i>Elementul de anvelopă</i>								
Pereți exteriori	0.3÷2	1.2÷2	1.4÷2.1	1.7÷2.75	1.95÷2.75	2.2÷3.45	2.5÷3.45	2.5÷4.9
Ferestre	0.15	0.16÷0.25	0.2÷0.3	0.2÷0.45	0.2÷0.5	0.2÷0.5	0.2÷0.5	0.2÷0.5
Uși	0.12÷0.25	0.12÷0.25	0.12÷0.25	0.25÷0.35	0.25÷0.35	0.25÷0.35	0.35	0.35
Planșee acoperiș	2.7÷5.2	3.2÷6.5	3.2÷6.5	3.2÷6.5	3.2÷6.5	3.6÷6.5	3.6÷6.55	3.65÷8.4
Planșee inferioare	0.5÷0.62	1.65÷3.45	1.65÷3.45	2.05÷5.35	2.4÷5.35	2.75÷5.35	2.75÷5.35	3.1÷5.35

Tab. 2.6 Valori minime ale rezistenței termice pentru clădiri din sectorul nerezidențial în SUA conform ASHRAE 90.1 - 2016

	R _{min} pentru clădiri nerezidențiale [(m ² K)/W]								
Zona climatică	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
<i>Elementul de anvelopă</i>									
Pereți exteriori	0.3÷1.98	0.3÷1.98	1.17÷2.10	1.43÷2.29	1.69÷2.94	1.96÷3.52	2.20÷3.60	2.48÷4.01	3.67÷5.51
Ferestre	0.21÷0.55	0.16÷0.35	0.21÷0.48	0.23÷0.53	0.26÷0.57	0.26÷0.57	0.26÷0.59	0.26÷0.63	0.26÷0.70
Uși	0.48÷0.57	0.48÷0.57	0.48÷0.57	0.48÷0.57	0.48÷0.57	0.48÷0.57	0.48÷0.57	0.48÷0.57	0.48÷0.57
Planșee acoperiș	4.3÷6.53	3.67÷6.53	4.3÷6.53	4.30÷6.53	4.76÷8.39	4.76÷8.39	5.51÷8.39	6.08÷8.39	6.29÷10.37
Planșee inferioare	0.50÷0.62	0.50÷0.62	1.65÷5.34	2.38÷5.34	3.09÷5.34	3.09÷5.34	3.46÷6.53	4.20÷6.53	4.64÷6.53

Tab. 2.7 Valori minime ale rezistenței termice pentru clădiri semi-încălzite în SUA conform ASHRAE 90.1 - 2010

	R _{min} pentru clădiri semi-încălzite [(m ² K)/W]							
Zona climatică	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
<i>Elementul de anvelopă</i>								
Pereți exteriori	0.3÷1.55	0.3÷2	0.3÷2	0.3÷2	1.2÷2	1.2÷2	1.4÷2	1.55÷2.1
Ferestre	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.2÷0.3	0.2÷0.3	0.2÷0.3
Uși	0.12÷0.25	0.12÷0.25	0.12÷0.25	0.12÷0.25	0.12÷0.25	0.12÷0.25	0.12÷0.25	0.25÷0.35
Planșee acoperiș	0.8÷2.2	0.8÷2.2	1.0÷3.35	1.0÷3.35	1.5÷3.35	1.9÷5.2	1.9÷5.2	2.7÷5.2
Planșee inferioare	0.5÷0.62	0.55÷2.65	0.55÷2.65	1.3÷2.65	1.3÷3.45	1.3÷3.45	1.65÷3.45	2.05÷5.35

Tab. 2.8 Valori minime ale rezistenței termice pentru clădiri semi-încălzite în SUA conform ASHRAE 90.1 - 2016

	R _{min} pentru clădiri semi-încălzite [(m ² K)/W]								
Zona climatică	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
<i>Elementul de anvelopă</i>									
Pereți exteriori	0.30÷0.60	0.30÷0.50	0.30÷1.98	0.30÷1.98	0.30÷1.98	1.17÷1.98	1.17÷1.98	1.43÷2.75	1.69÷3.46
Ferestre	0.15÷0.19	0.15÷0.19	0.15÷0.19	0.15÷0.23	0.22÷0.35	0.23÷0.39	0.23÷0.39	0.23÷0.55	0.23÷0.55
Uși	0.12÷0.25	0.12÷0.25	0.12÷0.25	0.48÷0.49	0.48÷0.49	0.48÷0.49	0.48÷0.49	0.48÷0.57	0.48÷0.57
Planșee acoperiș	0.81÷2.18	0.81÷2.18	1.02÷3.33	1.48÷3.33	1.89÷5.18	2.80÷5.18	2.80÷5.18	4.52÷6.53	4.52÷6.53
Planșee inferioare	0.55÷0.62	0.55÷0.62	0.55÷2.67	1.29÷3.46	1.65÷3.46	1.65÷3.46	2.03÷3.46	2.38÷3.46	2.75÷5.34

În Japonia, problematica eficienței energetice a clădirilor este reglementată prin Legea de Conservare a Energiei, care a fost adoptată pentru prima oară în 1979.

Reglementările tehnice au fost elaborate ca urmare a implementării legii la nivel național și se abordează diferit clădirile de locuit, respectiv clădirile din sectorul terțiar, astfel se aplică:

- “Ghiduri de proiectare și construcție privind raționalizarea consumului de energie pentru case (DCGREUH)” - pentru clădiri rezidențiale;
- “Criterii pentru beneficiari privind raționalizarea consumului de energie pentru case (DCGREUH)” – pentru clădiri rezidențiale;
- “Criterii pentru raționalizarea utilizării energiei pentru clădiri (CCREUB)” - pentru clădiri nerezidențiale.

Există scheme obligatorii privitor la raportarea măsurilor de eficiență energetică și a conformității cu standardele, respectiv privind etichetarea clădirilor, pentru clădirile cu o suprafață mai mare de 2000 m².

Pentru clădirile din sectorul rezidențial, standardul cuprinde valori limită pentru transmitanța termică U pe tip de element de anvelopă în funcție de sistemul constructiv și de disponerea termoizolației la interior sau la exterior.

Pentru clădirile din sectorul nerezidențial și pentru clădiri de locuit de dimensiuni mari, se aplică prevederile standardului “Criterii pentru beneficiari cu privire la raționalizarea energiei în clădiri”. Acest standard se bazează pe performanța energetică sau valori-cadru de energie prestabilite. Aceste valori sunt stabilite, în principal, pentru două tipuri de indicatori: PAL (Perimeter Annual Load) – privind performanța anvelopei clădirii și valori CEC, privind coeficientul sau consumul de energie pentru echipamente.

Cele două valori sunt calculate cu următoarele formule:

$$PAL = \frac{\text{Annual space conditioning load [MJ/year]}}{\text{Area of perimeter zone [m}^2\text{]}} = \frac{\text{Necesarul anual de încălzire/răcire [MJ/an]}}{\text{Zona perimetrală [m}^2\text{]}}$$

$$CEC = \frac{\text{Actual Energy Consumption [MJ / year]}}{\text{Standard Energy Consumption [MJ/year]}} = \frac{\text{Consumul de energie real [MJ/an]}}{\text{Consumul standard de energie [MJ/an]}}$$

Valorile PAL sunt stabilite pentru întreaga clădire, folosind “Zona perimetrală”, care este spațiul interior cuprins la distanța de 5 m față de peretele exterior și intradosul planșeului. Se utilizează factori de corecție pentru a se ține cont de diferite rapoarte de suprafețe anvelopă per volum încălzit. Valorile impuse pentru indicatorul PAL pentru clădiri din sectorul terțiar sunt prezentate în Tab. 2.9.

Tab. 2.9 Valorile maxime admise pentru indicatorul PAL în Japonia

Destinația clădirii	Hotel	Spital (clinică)	Retail (comercial)	Birouri	Școală	Restaurant	Hală industrială
PAL [MJ/(m ² an)]	420	340	380	300	320	550	550
PAL [kWh/(m ² an)]	117	95	105	85	90	153	153

În China, standardele de eficiență energetică au fost adoptate separat pe zone ale țării de-a lungul timpului [16]:

- “Standardul de eficiență energetică pentru clădiri rezidențiale în zona de încălzire în Nordul Chinei”, din 1986, revizuită în 1995;
- „Standard pentru clădirile rezidențiale din regiunile cu clima temperată, cu veri calde și ierni reci din centrul Chinei”, din 2001;
- „Standard pentru clădirile rezidențiale din regiunile cu clima caldă din Sudul Chinei”, din 2003;
- „Standard pentru hoteluri turistice”, din 1993;
- „Standarde pentru clădiri publice și comerciale”, din 2003.

Se poate remarca că interesul în sensul asigurării unor cerințe minime de performanță energetică, pentru clădirile din sectorul terțiar, cu altă destinație decât cea de locuit, a survenit ulterior celor din sectorul rezidențial, și la nivel mondial interesul este puțin mai scăzut, dar în continuă creștere.

O altă observație este că într-un interval relativ redus de timp (5-6 ani) cerințele de performanță energetică au crescut semnificativ, după cum se poate observa în evoluția EnEV (Germania) sau ASHRAE (SUA), indiciu al unei evoluții rapide a măsurilor întreprinse la nivel internațional pentru reducerea consumurilor energetice rezultate din exploatarea clădirilor.

2.1.4 Studiul bibliografic al cadrului normativ național

În România, normativul C107/2-2005 tratează clădirile cu altă destinație decât cea de locuit. În acest normativ se indică valorile limită ale rezistenței termice, care au fost valabile în perioada 1997-2011, în funcție de zona climatică unde este localizată clădirea, clasa de inerție termică, respectiv de regimul de ocupare continuă sau discontinuă al clădirii [28].

- Clădiri categoria 1 – cu “ocupare continuă”, cu “ocupare discontinuă” de clasă de inerție mare – Tab. 2.10.

Tab. 2.10 Rezistențe minime corectate pentru clădiri industriale de categoria 1 conform C107/5-2005

Destinația clădirii	Rezistența la transfer termic R'_{min} [(m ² K)/W]			
	Zona climatică	Pereți verticali	Acoperiș	Suprafețe vitrate
Alte clădiri (industriale cu regim normal de exploatare)	I	0.65	1.80	0.25
	II	0.70	2.00	0.25
	III	0.75	2.20	0.25

Clădiri categoria 2 – cu “ocupare discontinuă”, cu excepția celor din clasa de inerție mare – Tab. 2.11.

Tab. 2.11 Rezistențe minime corectate pentru clădiri industriale de categoria 2 conform C107/5-2005

Destinația clădirii	Rezistența la transfer termic R'_{min} [(m ² K)/W]			
	Zona climatică	Pereți verticali	Acoperiș	Suprafețe vitrate
Alte clădiri (industriale cu regim normal de exploatare)	I	0.55	1.40	0.25
	II	0.60	1.50	0.25
	III	0.65	1.60	0.25

Prin Ordinul nr. 2513/2010 [29], referitor la modificarea normativului C107/2-2005, începând cu anul 2011 aceste valori au fost majorate, valorile impuse fiind redate în Tab. 2.12, și care s-au păstrat și la actualizarea cerințelor minime de performanță energetică introdusă prin Ordinul MDRAPFE 2641/2017 [30], referitor la modificarea și completarea metodologiei de calcul MC001/2006.

Tab. 2.12 Rezistențe minime corectate pentru clădiri industriale conform C107/5-2005, actualizat în 2011

Rezistența termică minimă R'_{min} [(m ² K)/W]							
Destinația clădirii	Zona climatică	Clădiri categoria 1			Clădiri categoria 2		
		Pereți verticali	Acoperiș	Suprafețe vitrate	Pereți verticali	Acoperiș	Suprafețe vitrate
Alte clădiri (industriale cu regim normal de exploatare)	I	1.10	3.00	0.40	1.00	2.90	0.40
	II	1.10	3.00	0.40	1.00	2.90	0.40
	III	1.10	3.00	0.40	1.00	2.90	0.40
	IV	1.10	3.00	0.40	1.00	2.90	0.40

Ca regulă generală, pentru zona climatică V se extrapolează valorile aferente zonei IV, însă mod particular, pentru acest tip de clădire nerezidențială prezentat mai sus se poate observa că valorile sunt identice pentru toate zonele climatice din România, implicit pentru zona V.

Urmând tendințele internaționale, dar și în vederea respectării cerințelor Directivei Europene EPBD, în 2016 normativul C107-2005 se completează cu indicatori țintă, care pentru Orizontul de timp 31.12.2020 reprezintă chiar indicatorii țintă definiți la nivel național în raportul de țară în care s-a definit performanța energetică minim admisibilă care permite încadrarea clădirilor în categoria de clădirilor de tip NZEB, și care cuprind valori țintă de consumuri specifice de energie primară, cât și valori maxime pentru emisiile specifice de CO₂, atât pentru clădirile din sectorul rezidențial, cât și pentru câteva tipuri de clădiri din sectorul nerezidențial [31].

Tab. 2.13 Nivelul necesarului de energie primară neregenerabilă pentru clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero [32]

Zona climatică	Orizont	CATEGORII DE CLĂDIRI									
		CLĂDIRI DE LOCUIT INDIVIDUALE		CLĂDIRI DE LOCUIT COLECTIVE		CLĂDIRI DE BIROURI		CLĂDIRI DESTINATE ÎNVĂȚĂMÂNTULUI		CLĂDIRI DESTINATE SISTEMULUI SANITAR	
		Energie primară	Emisii CO ₂	Energie primară	Emisii CO ₂	Energie primară	Emisii CO ₂	Energie primară	Emisii CO ₂	Energie primară	Emisii CO ₂
		[kWh/m ² an]	[kg/m ² an]	[kWh/m ² an]	[kg/m ² an]	[kWh/m ² an]	[kg/m ² an]	[kWh/m ² an]	[kg/m ² an]	[kWh/m ² an]	[kg/m ² an]
I (-12°C)	2015	131	36	105	28	75	21	115	28	135	37
	31.12.2018	115	31	100	25	50	13	100	25	79	21
	31.12.2020	98	24	93	25	45	12	92	24	76	21
II (-15°C)	2015	147	42	112	30	93	27	135	37	155	43
	31.12.2018	121	34	105	28	57	15	120	25	97	27
	31.12.2020	111	30	100	27	57	15	115	30	97	26
III (-18°C)	2015	172	48	130	36	110	28	154	39	171	49
	31.12.2018	155	41	122	34	69	19	136	37	115	32
	31.12.2020	145	40	111	30	69	19	136	37	115	32
IV (-21°C)	2015	226	57	152	38	107	28	192	56	190	55
	31.12.2018	201	51	144	40	89	24	172	48	149	42
	31.12.2020	189	42	127	35	83	24	170	49	142	41
V (-24°C)	2015	248	78	178	48	127	29	210	58	214	58
	31.12.2018	229	57	152	38	98	28	192	56	174	49
	31.12.2020	217	54	135	37	89	24	185	53	167	48

2.2 Metode de calcul utilizate în mod curent în proiectarea energetică a construcțiilor

2.2.1 Prezentarea unor metode analitice de calcul al performanței energetice pentru clădirile nerezidențiale

În prezent, în metodologia utilizată în România, la calculul pentru evaluarea necesarului energetic anual nu se face distincție între clădirile de locuit și clădirile care au altă destinație decât cea de locuire. Astfel, în Metodologia de calcul a performanței energetice MC001/2006 [4], pentru evaluarea necesarului de încălzire și răcire al unei clădiri se face un bilanț termic între pierderile termice și aporturile de căldură ale clădirii. Această metodă este preluată din standardul european SR EN ISO 13790 [33], iar pentru determinarea necesarului de încălzire, Q_h , este prezentată mai jos.

$$Q_h = Q_L - \eta \cdot Q_g \quad [\text{kWh}] \quad (2-1)$$

unde:

$$Q_L = H \cdot (T_i - T_e) \cdot t \quad [\text{kWh}] \quad (2-2)$$

Q_L – pierderi termice totale [kWh];

η – factor de utilizare al aporturilor de căldură [-];

Q_g – aporturi de căldură totale (aporturi solare pasive și degajări de căldură interne) [kWh];

H – coeficientul de pierderi termice al clădirii:

$$H = H_T + H_V \dots [\text{W/K}] \quad (2-3)$$

Coeficientul de pierderi prin transmisie, ținând cont de influența punților termice se calculează:

$$H_T = L + H_{sol} + H_{u\dots}[W/K] \quad (2-4)$$

unde:

L - coeficient de cuplaj termic prin anvelopa clădirii [W/K]

De altfel, metoda este în conformitate cu prevederile standardelor europene: SR EN ISO 13789 [34] și SR EN ISO 13370 [2].

Coeficientul de cuplaj termic se calculează cu relația (2-5):

$$L = \sum U_j \cdot A_j + \sum \psi_k \cdot l_k + \sum \chi_j \dots [W/K] \quad (2-5)$$

În normativul german DIN V 18599, necesarul de căldură se determină tot pe baza bilanțului termic între pierderile de căldură ale clădirii și aporturi, cu diferența că coeficientul de cuplaj se determină cu relația (2-6) [35]:

$$H_T = \sum (F_{xj} \cdot U_j \cdot A_j) + \Delta U_{tb} \cdot A \dots [W/K] \quad (2-6)$$

unde:

F_{xj} – factor de corecție a temperaturilor;

ΔU_{tb} – factor de majorare a valorilor U, ținând cont de pierderile suplimentare cauzate de punțile termice.

Caracteristic acestui normativ este coeficientul special de pierderi prin transmisie specific H_T' , care pentru clădirea reală se calculează cu relația (2-7) [35];

$$H_T' = \frac{H_T}{A} \quad [W/(m^2 K)] \quad (2-7)$$

iar pentru clădirea de referință se calculează cu relațiile (2-8) și (2-9) [36], [37]:

- Pentru clădiri cu temperatura interioară $>19^\circ C$ și cu raportul suprafețe vitrate/aria fațadei $<30\%$:

$$H_T' = 0.23 + 0.12/(A/V_e) \quad [W/(m^2 K)] \quad (2-8)$$

- Pentru clădiri cu temperatura interioară $>19^\circ C$ și cu raportul suprafețe vitrate/aria fațadei $>30\%$:

$$H_T' = 0.27 + 0.18/(A/V_e) \quad [W/(m^2 K)] \quad (2-9)$$

unde:

A – aria anvelopei clădirii [m^2];

V_e – volumul încălzit în sistemul convențional de dimensiuni exterior) [m^3].

În Fig. 2.4 sunt redate grafic valorile impuse pentru H_T' la clădirea de referință în funcție de raportul A/V_e [36].

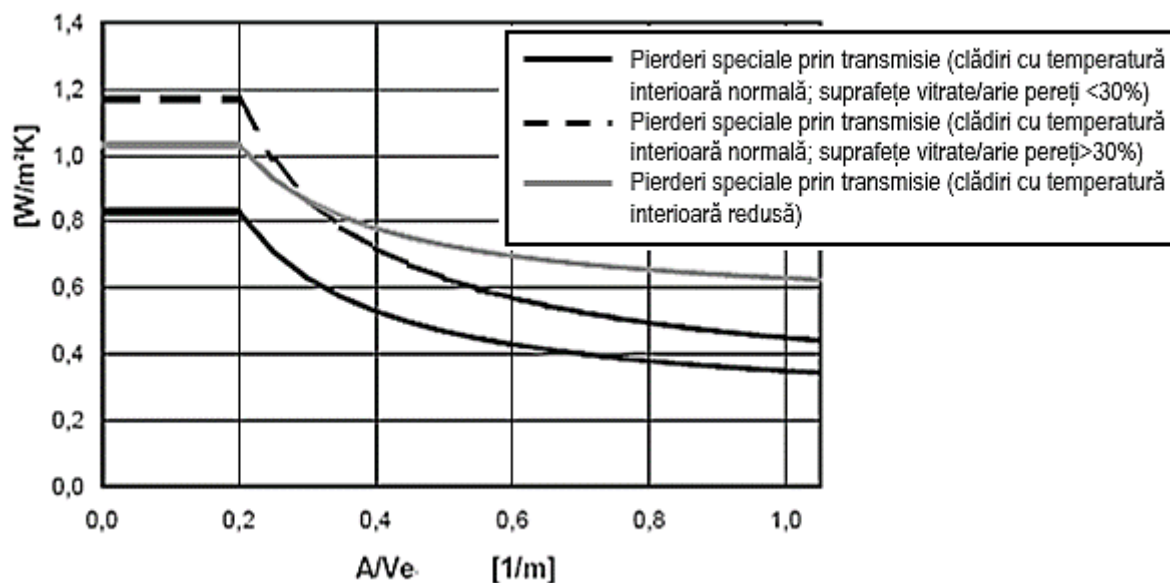


Fig. 2.4 Valori de referință ale coeficientului special de pierderi termice prin transmisie pentru clădirea de referință din sectorul terțiar în Germania

Pentru clădirile cu temperatura interioară mai scăzută, acest coeficient este important, fiind singurul parametru în metodologia germană care limitează pierderile prin anvelopă la acest tip de clădiri.

Valoarea coeficientului H_T' al unei clădiri este similar, dar nu egal, cu valoarea medie a transmitanței U a anvelopei clădirii [36].

În EnEv 2014 [38] există valori maxime prescrise pentru H_T' pentru clădirile rezidențiale.

Celelalte relații de calcul care derivă din efectuarea bilanțului termic descris în relația (2-1) se regăsesc în MC 001-2006 [4]. Scopul acestui subcapitol a fost să puncteze câteva aspecte diferite pentru țări diferite și nicidecum să redea integral prevederile tehnice descrise pe larg în MC 001-2006.

2.2.2 Analiza unor probleme specifice calculului termotehnic prin utilizarea unor metode numerice

Două probleme importante specifice calculului termotehnic al clădirilor, de regulă introduse în proiectele curente din ingineria civilă cu metode analitice simplificate sunt:

- Analiza efectului punților termice asupra performanței termice a elementelor și detaliilor constructive;
- Influența masei termice asupra comportamentului clădirii pe durate îndelungate.

Pentru obținerea unei previzionări cât mai exacte a răspunsului clădirii sub acțiunea solicitărilor termice sunt necesare modele comprehensive care să surprindă din punct de vedere fizic cât mai precis fenomenul care are loc. Legile fizice specifice acestui domeniu sunt descrise matematic sub forma unor ecuații diferențiale (vezi eq. (2-14) și (2-15)), care implică soluții analitice greoaie și limitate. Odată cu apariția calculatorului și a metodelor numerice, rezolvarea ecuațiilor diferențiale specifice a cunoscut o dezvoltare semnificativă, iar pentru

cercetările aplicative specifice domeniului ingineresc, permițând practic mutarea focusului de la rezolvarea matematică a modelului, la studiul propriu-zis al fenomenului fizic și al efectelor lui asupra clădirii.

În mod uzual, în proiectarea termotehnică, analiza la nivel de detaliu constructiv, necesară pentru determinarea efectului punților termice asupra performanței termice a elementelor anvelopei clădirii se efectuează în regim staționar, adică se admite ipoteza simplificatoare conform căreia temperaturile a două medii separate de un element de construcție nu variază în timp. Rezultatele acestui tip de analiză sunt integrate în metode analitice pentru calculul la nivel de clădire, cum sunt cele menționate în subcap. 2.2.

În cazul în care se intenționează elaborarea de analize comprehensive a unor părți de clădire sau ale clădirii întregi, pe anumite intervale de timp, analiza se efectuează în regim nestaționar, adică temperaturile variază în timp și se ține cont de proprietățile de inerție termică ale materialelor din elementele de construcție.

Evaluarea câmpului de temperaturi în elementele de construcție, la schimbul de căldură cu mediul exterior se poate face prin mai multe tipuri de analiză:

- Analiza monodimensională – temperatura variază pe o singură direcție principală (considerată aici axa x); se utilizează ecuația lui Laplace (2-10), respectiv ecuația lui Fourier (2-11):

- În regim termic staționar:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (2-10)$$

- În regim termic nestaționar:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-11)$$

Acest tip de analiză se utilizează doar la materiale omogene și condiții de contur constante.

- Analiza bidimensională – se impune când temperatura variază pe două direcții și elementele de construcție nu sunt omogene, pe cea de-a treia direcție variația temperaturii este neglijabilă;

- În regim termic staționar:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (2-12)$$

Acest tip de analiză, se impune cel mai frecvent datorită detaliilor constructive uzuale neomogene cu elemente multistrat.

- În regim termic nestaționar:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-13)$$

- Analiza tridimensională – este necesară când datorită detaliului de alcătuire câmpul de temperaturi variază pe toate cele trei direcții (x, y și z) și/ sau condițiile de contur nu sunt constante. Relațiile constitutive (2-10) și (2-11) se rescriu:

- În regim termic staționar:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2-14)$$

- În regim termic nestaționar:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-15)$$

În vederea obținerii de performanță energetică, pentru a se evalua transferul termic dintre o clădire și mediul exterior o atenție sporită trebuie acordată punților termice. Punțile termice sunt zonele slabe din anvelopa unei clădiri, zone unde fluxul termic se intensifică și astfel pierderile de căldură dintre mediul interior cu exteriorul clădirii sunt mai mari. Fenomenul poate duce la pierderi termice necontrolate, având ca efecte apariția condensului și a mucegaiului, cu posibilitatea afectării sănătății oamenilor [4]. Noțiuni teoretice suplimentare cu privire la acest subiect vor fi prezentate în cap. 3 și cap. 4.

La ora actuală, la nivel european standardul SR EN ISO 10211:2017 oferă conținutul cadru necesar elaborării modelelor de calcul pentru evaluarea detaliată a punților termice, pentru analize numerice a transferului de flux termic, în coordonate carteziane bidimensionale și tridimensionale, ținându-se cont de discontinuitatea rezistenței termice în zonele de punți termice prezente în elementele anvelopei clădirii.

Calcululele numerice se realizează cu programe specifice analizei de câmp termic în regim termic staționar sau nestaționar. Pentru simulări numerice în regim termic staționar, în cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca la nivelul anilor '80 s-au elaborat de către prof. Ioan Moga programele CIMPLAN și CIMSPAT. La nivel internațional se utilizează programe elaborate în cadrul unor centre universitare, cum sunt: THERM, NORM, etc.

Programul de calcul THERM este un program freeware, elaborat de Universitatea Berkeley din California, agrementat și utilizat de către cercetători și specialiști americani și internaționali în cercetări aplicative pentru detalii constructive complexe. Programul efectuează calculul câmpului de temperaturi bidimensional prin Metoda Elementului Finit (MEF), în regim termic staționar [39].

Fig. 2.5 prezintă pașii de lucru necesari la implementarea în programul THERM a unui detaliu constructiv în vederea analizei punții/punților termice existente, în regim staționar; acești pași de lucru corespund de regulă programelor automatizate bazate pe metodele numerice de tip MEF sau MDF (Metoda Diferențelor Finite).

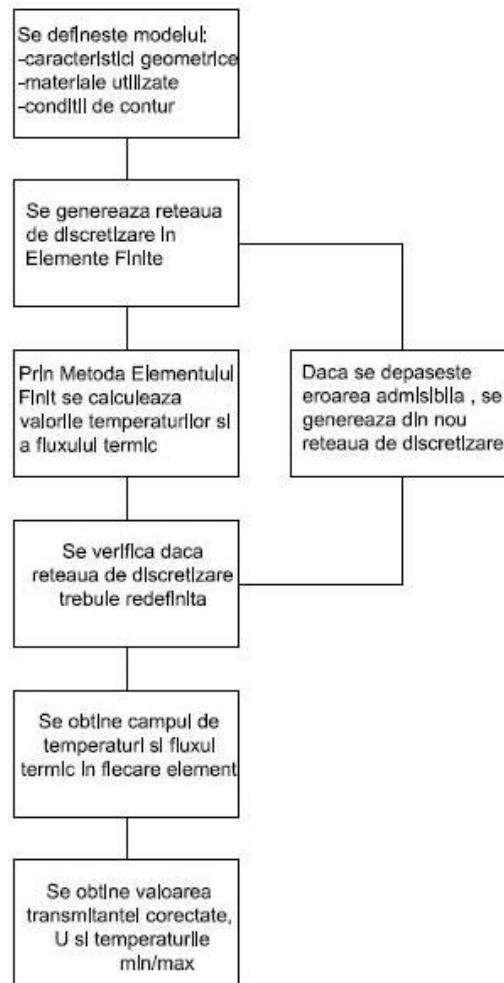


Fig. 2.5 Pașii de lucru necesari în analiza numerică a unui detaliu constructiv în programul THERM

În Fig. 2.6 se exemplifică rezultatele furnizate de către programul THERM în cazul analizei numerice a transferului termic într-o îmbinare curentă cu punte termică a două panouri de perete - detaliu de îmbinare orizontală perete din panouri termoizolate cu înveliș metalic de tip sandwich, cu material termoizolant PUR.

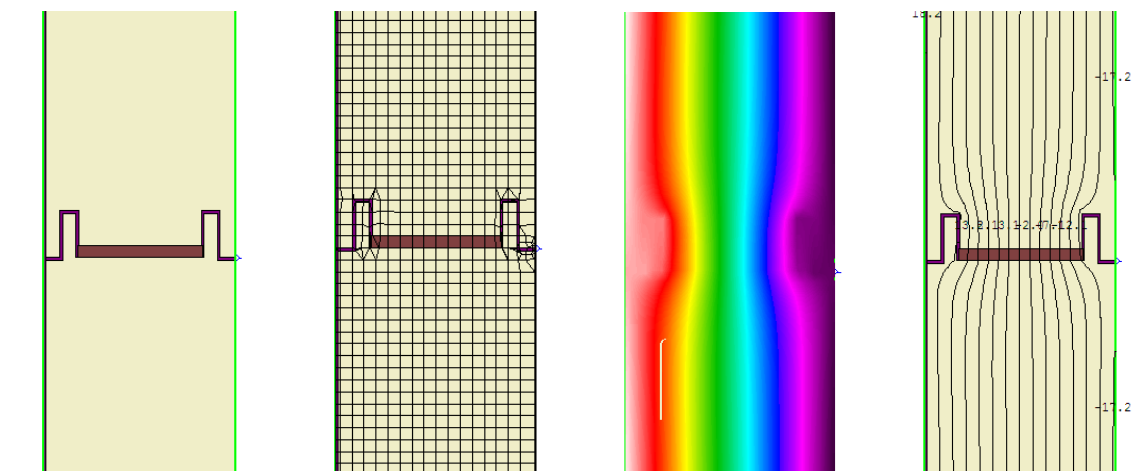


Fig. 2.6 Simulare numerică - detaliu îmbinare panouri de perete termoizolate cu înveliș metalic de tip sandwich
a) Geometrie îmbinare panou b) Rețea de discretizare c) Suprafețe izoterme d) Linii izoterme

Dacă pentru detaliile constructive aferente soluțiilor structurale uzuale (de regulă zidării și elemente din beton armat) există o vastă documentație de specialitate diseminată la scară largă, care în care sunt precalculate numeric valorile coeficienților liniari de transfer termic [40], [41], [42], [43], [44], [45] permițând astfel introducerea efectului punților termice în analiza consumului de energie al clădirii, pentru soluțiile structurale metalice (cadre metalice cu închideri din panouri metalice de tip sandwich, panouri portante din profile subțiri laminate metalice) sau soluții structurale din lemn (lemn masiv structural portant, panouri din lemn masiv sau panouri din lemn lamelar încleiat prevăzute cu termoizolație în structura panoului), de regulă nu există documentație sau studiile efectuate sunt limitate [46], [47]. Soluțiile structurale metalice sunt asociate de obicei cu clădirile din sectorul nerezidențial.

Pe direcția detalii constructive clădiri din sectorul terțiar, așa cum reiese din cercetările actuale, efectul punților termice este relevant. Kosny and Christian [48] au efectuat simulări numerice bazate pe metoda diferențelor finite pentru panouri metalice pentru pereți și au obținut că pentru un procent de 30% de zone cu punți termice raportat la suprafața panoului de perete, rezistența termică corectată se reduce la 50% față de valoarea ei în câmpul panoului.

Angelis and Serra [49] au efectuat simulări numerice cu programele THERM și WUFI pe panouri de pereți din profile subțiri laminate la rece și au obținut un procent de reducere de 42% în câmpul panoului, efect rezultat doar din conformarea structurală și arhitecturală a panoului.

O analiză termotehnică extensivă a panourilor constructive din profile subțiri laminate la rece a fost făcută de Lupan [50].

În ceea ce privește panourile metalice de închidere de tip sandwich, la momentul începerii acestei teze nu s-au găsit studii privind performanța lor termică, analiza acestor tipuri de detalii devenind astfel unul dintre obiectivele acestei teze.

O altă problemă specifică la nivel de calcul pentru clădirile din sectorul terțiar îl reprezintă calculul performanțelor energetice ținând cont de inerția termică a clădirii, respectiv de regimul termic de exploatare. Această problemă este caracteristică regimului termic nestaționar, iar studiile întreprinse pentru cunoașterea științifică pe această direcție se pot face fie prin simulări dinamice, fie prin măsurători.

Principalii parametri caracteristici regimului termic nestaționar sunt:

- Coeficientul de amortizare a amplitudinii oscilației temperaturii – raportul dintre amplitudinea fluctuațiilor de temperatură de pe o față a unui element de construcție supus unui flux termic variabil și amplitudinea de oscilație a temperaturii pe fața opusă, în momentul în care fluxul termic se manifestă pe această față tot cu valoare maximă;
- Coeficientul de defazaj – care reprezintă timpul după care un maxim de flux termic de pe o față a unui element de construcție se resimte tot cu o valoare maximă, dar atenuată, pe o față opusă.

Simularea numerică simultană a fenomenelor de transfer termic și de masă, respectiv transfer de umiditate în regim nestaționar se pot efectua cu programul WUFI 2D, a cărui bază a realizat-o Künzl [51].

În continuare sunt descrise rezultatele unor studii științifice pe acest subiect, efectuate în ultimii ani, cu relevanță în special pentru sectorul clădirilor nerezidențiale.

Mărind inerția termică, se mărește capacitatea de stocare a căldurii a anvelopei clădirii, se reduc fluctuațiile temperaturilor superficiale la suprafața interioară a elementului de construcție și se mărește coeficientul de defazaj. Termoizolația se utilizează pentru mărirea valorilor rezistenței termice și pentru reducerea transmisiei termice. În studii recent întreprinse Al Sanea and Zedan [52] au demonstrat interacțiunea dintre efectele inerției termice și efectele termoizolației, rezultatele cercetării lor confirmând faptul că inerția termică are rol în reducerea transferului termic, iar termoizolația se utilizează pentru reducerea coeficientului de asimilare termică a suprafeței și mărirea coeficientului de defazaj.

Din cauza masei mici (a grosimii reduse a elementelor de închidere perimetrală) a clădirilor pe structura metalică cu închideri de tip panou sandwich și a schimbării condițiilor climatice exterioare în alternanța zi-noapte, sezon cald-rece, acumularea termică este foarte redusă, ceea ce implică variații mari ale temperaturii interioare, în special în zona elementelor de închidere [53].

Conform unor cercetări actuale, rezistența termică care se calculează în regim termic staționar, poate varia substanțial față de rezistența termică calculată în regim nestaționar [52].

Există studii care propun calculul dinamic al punților termice (ținând cont de inerția termică) prin: metoda peretelui echivalent pe baza analogiei termo-electrice [54], metoda condițiilor de contur (BEM – Boundary Element Method) [55].

În unele studii s-a atras atenția asupra detaliilor constructive a căror inerție diferă mult între materiale (de ex. puntea termică liniară de la îmbinare toc fereastra cu peretele exterior), simplificarea calculelor ducând la erori de valoarea rezistenței termice corectate de până la 11%. Pentru o acuratețe mai mare a rezultatelor, cercetările s-au condus prin măsurători directe a fluxului termic și a parametrilor caracteristici regimului termic nestaționar, cu simulări cu ajutorul cutiilor de tip “hot-box” [56].

2.2.3 Termografia în infraroșu ca metodă complementară în analiza energetică

Termografia este tehnica de a produce o imagine vizibilă a energiei invizibile (radiația în infraroșu) emisă de suprafața unui obiect, cu ajutorul camerei de termoviziune [57], [58], [59] (a se vedea Fig. 2.7).



Fig. 2.7 Imagine termografică a fațadei unei clădiri [60]

Tehnica imagistică de termografiere în infraroșu permite analiza calitativă a distribuției temperaturilor de suprafață ale elementelor anvelopei clădirilor și identificarea punților termice, respectiv a defectelor de execuție care pot provoca infiltrații de aer și condens [61], [60].

Pentru interpretarea corectă a termogramelor este importantă emisivitatea și reflectivitatea materialelor. Doar pentru materialele cu emisivitate ridicată se pot interpreta corect imaginile, pentru cele cu emisivitate redusă există posibilitatea să reflecte temperatura obiectelor din jur [59].

Pe baza unor cercetări s-au identificat câteva recomandări cu privire la modul în care se efectuează preluarea imaginilor cu camera de termoviziune. O parte din aceste recomandări se regăsesc și în normativul aplicabil la nivel național, MP 037/2004.

- Fațada clădirii să nu fie expusă radiației solare directe, cu cel puțin 12 ore înaintea preluării imaginilor, ceea ce presupune alegerea unor zile reci și noroase ca și condiții de mediu [57], [62];
- Se recomandă preluarea imaginilor seara pentru a se reduce efectele radiației solare [58];
- Se recomandă ca diferența de temperatură între interior și exterior să fie de 10°C cu 24 h înaintea preluării imaginilor [57], 15°C conform [62];
- Clădirea nu se recomandă să fie expusă precipitațiilor cu 24 h înaintea preluării imaginilor [58];
- Viteza vântului maxim 10 m/s [58], sub 2 m/s conform [62];
- Variația temperaturii aerului interior și exterior să fie sub 2 °C pe durata înregistrării [62].

La ora actuală se fac cercetări prin care se încearcă utilizarea termografiei în infraroșu ca și metodă cantitativă de evaluare a pierderilor de căldură prin punțile termice. Astfel, într-un studiu din Italia efectuat de Asdrubali et al. [61] s-a definit un factor de incidență a punții termice, care depinde de temperatura aerului interior și de temperatura interioară a suprafeței peretelui, obținute cu ajutorul camerei în infraroșu. Se obține transmitanța corectată, metoda putând fi aplicată și la pereți a căror stratificație exactă nu se cunoaște.

În studiile efectuate în această teză termografierea a fost utilizată în cap. 6 pe clădiri reale, fiind utilizată ca și metodă calitativă de identificare a soluțiilor constructive utilizate în clădiri existente pentru care documentația tehnică inițială nu mai există, respectiv pentru determinarea defectelor ascunse de execuție.

2.3 Stadiul cercetărilor privind soluțiile constructive de închidere utilizate actual în cazul halelor industriale

2.3.1 Stadiul cercetărilor în România

În ceea ce privește soluțiile constructive noi, în România s-au făcut cercetări pe panouri sandwich cu învelișuri exterioare subțiri, rigide și miez celular. S-au studiat panouri sandwich cu miez din structuri celulare periodice expandate mecanic, atât din punct de vedere al

comportării la solicitări mecanice (statice și dinamice), cât și ca și izolare termică – prin umplerea spațiului intracelular cu spume cu conductivitate termică scăzută, obținându-se panouri sandwich cu funcții integrate [63] – vezi Fig. 2.8.



Fig. 2.8 Panou sandwich multifuncțional cu structură celulară expandată mecanic ExpaAsym, al cărui spațiu intracelular este umplut cu materiale stohastice [63]

Chiar în cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca, în cadrul tezei de doctorat, Lupan [50] a făcut studii termotehnice privind optimizarea unor panouri din profile subțiri laminate la rece și termoizolate, studiind în detaliu acest tip de soluție structurală și de închidere.

2.3.2 Stadiul cercetărilor la nivel global

La nivel mondial, în vederea reducerii consumului de energie, cercetările sunt efectuate integrat, pornindu-se de la proprietățile fizice și chimice ale materialelor. Astfel, în Grecia, Mastrapostoli et al. [64] au făcut cercetări pe panouri sandwich pe care s-au aplicat straturi de acoperire din materiale “reci” pe bază de fluorocarbon, care reflectă radiația solară și resping aporturile solare la suprafețele exterioare opace ale clădirii. După aplicarea prin pulverizare, aceste materiale reduc temperatura la suprafața panoului, reducându-se și temperatura interioară în interiorul halei sau necesarul de energie pentru a se menține o temperatură constantă la interior. Pentru o climă temperată, aceste materiale se pot utiliza la hale industriale care au aporturi mari la interior din procesul tehnologic, vara reducându-se necesarul de răcire al clădirii.

O altă direcție de cercetare în acest domeniu o reprezintă materialele cu schimbare de fază utilizate în panouri de pereți în vederea măririi capacității de stocare a energiei. Un experiment efectuat în Spania de către Castellon et al. [65] a studiat comportarea materialelor cu schimbare de fază microencapsulate (*Micronal BASF*) în panourile sandwich uzuale, formate din înveliș metalic la exterior și spumă poliuretanică injectată la interior, în vederea măririi inerției termice a panourilor, pentru a se reduce necesarul de energie în exploatare al clădirilor. Studiul a demonstrat posibilitatea măririi inerției termice a panourilor prin adăugarea materialelor cu schimbare de fază la fabricarea panourilor sandwich, cu posibilitatea îmbunătățirii comportării la transfer termic a panourilor, prin mărirea duratei încălzirii panourilor (creșterea inerției termice) la aceeași temperatură față de un panou de referință.

Carbonari et al. [66] au studiat panouri sandwich cu un strat de aer între materialul cu schimbare de fază (încapsulat în recipiente rigide) și învelișul metalic și au obținut un comportament energetic similar cu al pereților cu masă termică ridicată.

În ceea ce privește panourile termoizolate cu înveliș metalic de tip sandwich, deși nu este exclus ca să existe, autoarea nu a găsit cercetări din punct de vedere energetic sau studii termotehnice referitoare la această soluție constructivă, nici la nivel național, nici pe plan internațional, sub acest aspect evidențiindu-se necesitatea efectuării unor studii în această direcție.

2.4 Studiul unor construcții industriale realizate și a soluțiilor utilizate

2.4.1 Introducere în domeniul construcțiilor industriale

Primele mașini (utilaje) au apărut la începutul sec. al XVIII – lea înlocuind munca manuală și grupând personalul muncitor în ateliere. Astfel primele ateliere au fost cele de filatură și țesătorie, urmate în a doua jumătate a sec. al XVIII – lea de primele uzine sau ateliere mari.

În țara noastră, revoluția industrială s-a produs la începutul secolului al XX-lea, evidențiindu-se industria metalurgică, industria petrolului, industria cărbunelui, industria lemnului, apoi au apărut fabrici în ramuri de producție ca: ciment, textile, zahăr, sticlă, etc.

După primul război mondial numărul întreprinderilor care funcționau s-au redus atât de mult, încât în anul 1921 producția industrială a țării era 30-35% din producția dinaintea războiului. Pe durata celui de-al doilea război mondial, România a asigurat Germaniei cantități însemnate de produse petroliere, cereale și materii prime.

În perioada comunistă dezvoltarea industriei a atins apogeul, trecându-se la o acțiune de dezvoltare planificată a industriei, au fost construite uzine noi, au fost dezvoltate și modernizate uzine existente, au fost construite orașe noi în jurul uzinelor, orașele industriale (de ex. Câmpia Turzii) [67].

O consecință a avântului în industrie la nivel de economie națională, îl reprezenta interesul pentru cercetarea științifică pe acest domeniu. Un eveniment din această perioadă care reflectă interesul pentru economia de energie în anii '80 în domeniul construcțiilor industriale a fost al VI-lea Simpozion Internațional: *Optimizarea soluțiilor constructive și de plan-volum pentru construcții industriale și instalații aferente, din punct de vedere a economiei de energie*, din noiembrie 1981 de la Iași.

În prezent, industria ca ramură se află într-o perioadă de declin în țara noastră, în schimb apar cerințe noi privind utilizarea spațiului în orașe, astfel că pentru o parte dintre fostele platforme industriale se pune problema schimbării destinației și a exploatarei clădirilor în continuare, în măsura în care siguranța structurală o permite. Referitor la noile hale construite, soluțiile sunt cu precădere pe structura metalică.

Clădirile industriale pot fi executate:

- pe structură metalică;
- pe structură din beton armat;
- pe structură mixtă.

Halele pe structură metalică sunt cele mai utilizate și prezintă o mare varietate de destinații, în trecut deservind în special domeniul industrial cu regim și condiții grele de lucru: în siderurgie, hale cu pod rulant cu regim de lucru greu, în industria chimică, construcții industriale în zone cu grad de seismicitate ridicat sau așezate pe terenuri slabe, etc. Astăzi, domeniul de acoperire este mult mai vast, deservind în plus față de destinația lor de bază, mari complexe comerciale (mall-uri, showroom-uri auto, hypermarket-uri, diverse clădiri expoziționale, etc), clădiri de birouri sau chiar unități de învățământ și locuințe.

Soluțiile de închidere la halele industriale pe structură metalică, în prezent, sunt cu precădere panourile metalice de tip sandwich. Modele de panouri utilizate actual uzual pe piața din România pentru elemente de acoperiș se regăsesc în Fig. 2.9.

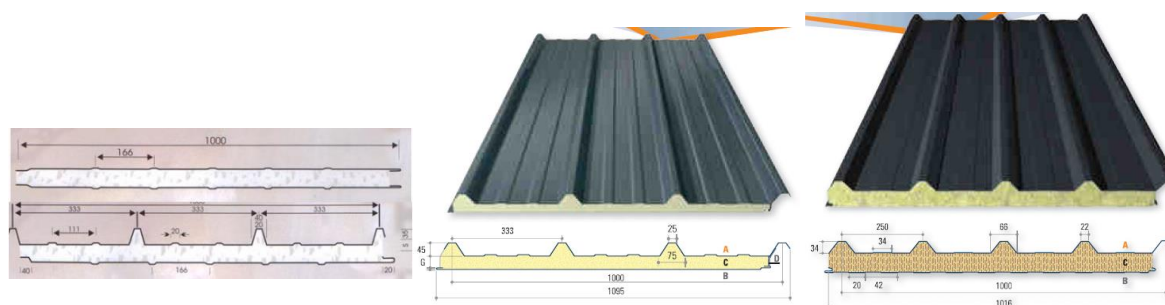


Fig. 2.9 Panouri termoizolate cu înveliș metalic de tip sandwich identificate în mod curent pe piața din România
 a) cu miez din polistiren b) cu miez din poliuretan c) cu miez din vata minerală

Halele pe structură din beton armat sau beton precomprimat s-au folosit pe scara largă în România în parcurile industriale. Halele din beton armat se utilizau la construcțiile de forme neregulate sau la cele la care se foloseau cofrajele glisante, cele din beton armat precomprimat se utilizau la majoritatea clădirilor industriale cu un singur nivel, proiectarea lor fiind mai rapidă, deoarece existau cataloage cu elemente tipizate.

Chiar și pentru soluțiile de închidere aceste cataloage [68] conțineau un număr mare de soluții prefabricate: astfel pentru acoperiș se utilizau în mod curent panouri prefabricate pentru acoperiș din beton armat (de ex.: panouri chesonate din beton armat fără strat termoizolant) – Fig. 2.10.a, beton precomprimat – Fig. 2.10.b, precomprimat parțial și din beton celular autoclavizat. Pentru pereți, se utilizau panouri prefabricate pentru pereți exteriori din beton celular autoclavizat (BCA), panouri în trei straturi dispuse orizontal sau vertical (fețe din beton armat și material termoizolant la interior cu grosimi de 15, 22, 22.5 cm) – Fig. 2.10.c.

O altă soluție utilizată era de pereți din plăci ondulate din azbociment pentru pereți neizolați termic, respectiv panouri de tip sandwich din azbociment: plăci plane din azbociment cu un strat de polistiren (azbopanul). În prezent, este interzisă folosirea azbocimentului în construcții [67].

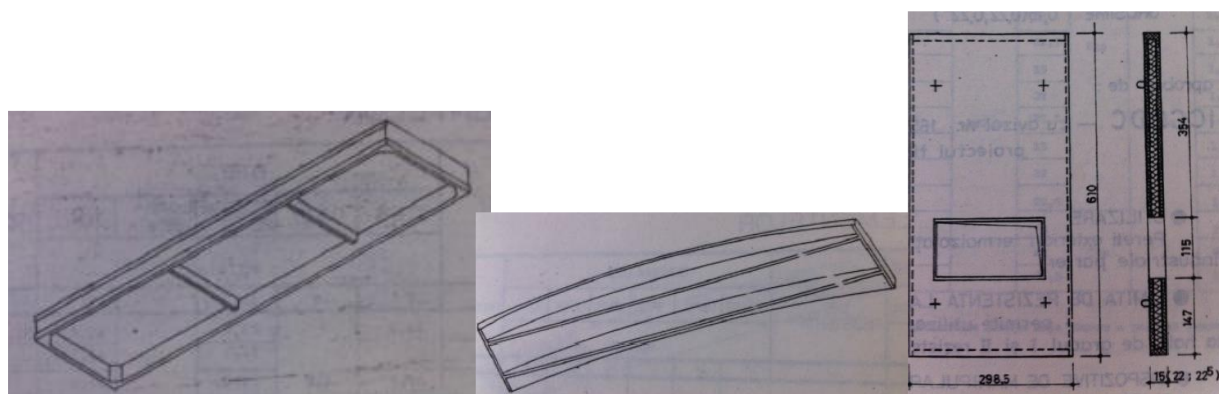


Fig. 2.10 Soluții de închidere pentru halele pe structură din beton armat [68]

a) Panouri chesonate din beton armat b) Panouri din beton precomprimat c) Panouri tristrat pentru pereți

S-au elaborat teze de doctorat care au studiat panouri de închidere pentru hale din betoane ușoare. Pe parcursul tezei, Ignaton [69] a realizat studii și încercări experimentale privind realizarea betoanelor ușoare: betoane ușoare spumate (BUS) ce utilizează cenușa de termocentrală, obținând următoarele proprietăți: conductivitatea termică obținută cu aparatul dr. Book, $\lambda = 0.16 - 0.22 \text{ W/(mK)}$ pentru betoane cu cenușă de Oradea, cu densitate $783 - 1050 \text{ kg/m}^3$ și $\lambda = 0.17 - 0.38 \text{ W/(mK)}$ pentru BUS Mintia, cu densitatea $800 - 1262 \text{ kg/m}^3$. S-a constatat că pentru fiecare procent de umiditate, conductivitatea termică a materialului crește cu 2..4%. Tot în această teză [69] s-au realizat cercetări experimentale privind realizarea betoanelor ușoare de granolit cu cenușă și spumant, obținându-se caracteristicile termotehnice: conductivitatea în stare uscată de 0.387 W/(mK) , cu densitatea de 1510 kg/m^3 , iar conductivitatea de calcul de 0.484 W/(mK) .

În prezent, aceste tipuri de soluții constructive, respectiv de închideri pentru hale se utilizează mai puțin, datorită avantajelor nete ale cadrelor metalice cu închideri din panouri metalice de tip sandwich, însă se pune problema renovării complexe pentru fostele platforme industriale în vederea schimbării destinației acestor spații a căror structură de rezistență aflată în stare bună permite exploatarea lor în continuare.

Un exemplu în acest sens este o hală cu structura cadre din beton armat dintr-o fostă fabrică din Cluj-Napoca, care s-a renovat și i-a fost schimbată destinația în bloc de locuințe – Fig. 2.11.



Fig. 2.11 Fostă hală din Cluj-Napoca transformată în bloc de locuințe cu păstrarea structurii de rezistență inițiale

Halele cu structură mixtă (beton armat prefabricat pentru fundații, stâlpi și grinzi, respectiv metal pentru unele grinzi și ferme) se utilizează în cazul necesității unor deschideri mari, cum pentru destinații cum sunt: hale pentru expoziții, săli de sport, hangare, hale cu

sisteme de ridicare și transport susținute de șarpanta acoperișului, etc., soluțiile de închidere fiind dintre cele menționate anterior.

În ceea ce privește proiectarea halelor, în trecut se impuneau dimensiuni modulare, astfel: pentru coordonarea dimensiunilor modulare în plan, la proiectarea halelor industriale se utiliza rețeaua modulară 30 M (3,00 m x 3,00 m). Dimensiunile deschiderilor (L) și a traveelor (T) se impunea să fie multipli de 30 M, până la dimensiunea de 180 M (18,00 m) inclusiv; peste această valoare dimensiunile (L) și (T) fiind multipli de 60 M (6,00 m). Pe înălțime, coordonarea dimensiunilor modulare se realiza la pereții exteriori ai halei, prin prevederea de elemente de închidere cu înălțimea multiplu de 3M sau prin poziționarea unor rigle ce intervin în alcătuirea pereților exteriori, având distanța multiplu de 3M, între nivelele elementelor corespunzătoare a două rigle succesive. În cazul construcțiilor industriale coordonarea modulară se aplica în mod obligatoriu [67].

În prezent, coordonarea modulară nu mai este obligatorie, iar soluțiile pe structură metalică, în special, permit realizări spectaculoase din punct de vedere architectural și structural [70].

Cork Airport Business Park, Cork, Destinație: comercial



Merryhill Business Park, Birmingham, Destinație: comercial



NCR Motherwell, Motherwell, Destinație: birouri



New Durham College, Durham, Destinație: facultate



Fig. 2.12 Clădiri din sectorul nerezidențial realizate închideri din panouri de tip sandwich [70]

2.4.2 Detalii constructive utilizate actual pentru închiderile halelor industriale

Detaliile constructive pentru închiderile halelor industriale, la ora actuală, sunt elaborate de producătorii de panouri ușoare. Datorită actualității lor, nu se regăsesc în literatura de specialitate informații cu privire la comportarea lor la transferul termic prin elementele anvelopei, precum și influența punților termice pentru zonele de îmbinare.

În mod aleatoriu s-au selectat o serie de detalii constructive existente pe piață, detalii care fac obiectul simulărilor numerice din studiile termotehnice întreprinse în cap. 3 – vezi Fig. 2.13, Fig. 2.14, Fig. 2.15, Fig. 2.16 și Fig. 2.17.

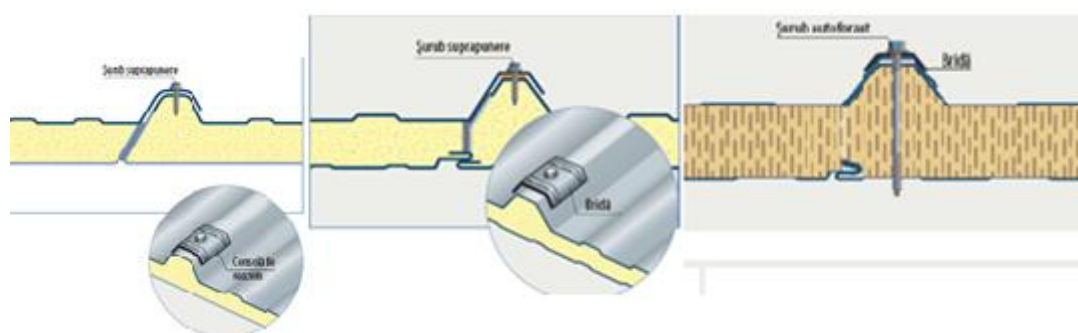


Fig. 2.13 Detalii îmbinare panouri de acoperiș

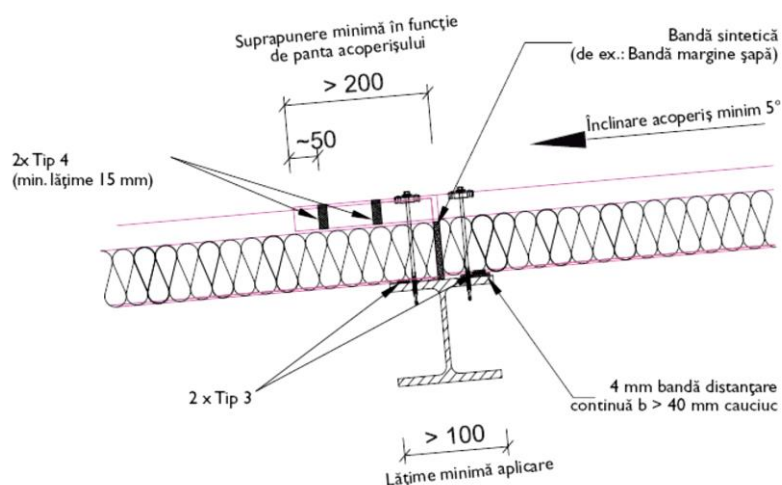


Fig. 2.14 Detaliu îmbinare transversală panouri de acoperiș

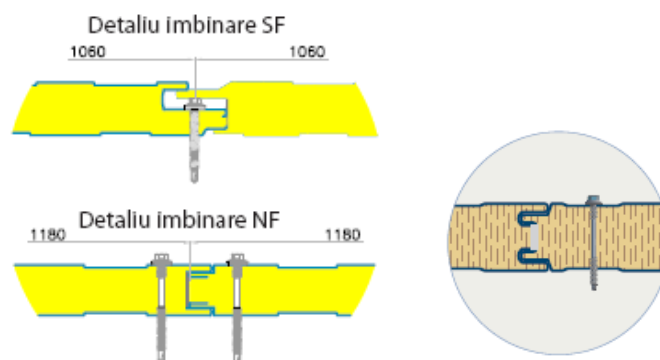


Fig. 2.15 Detalii îmbinare panouri de perete

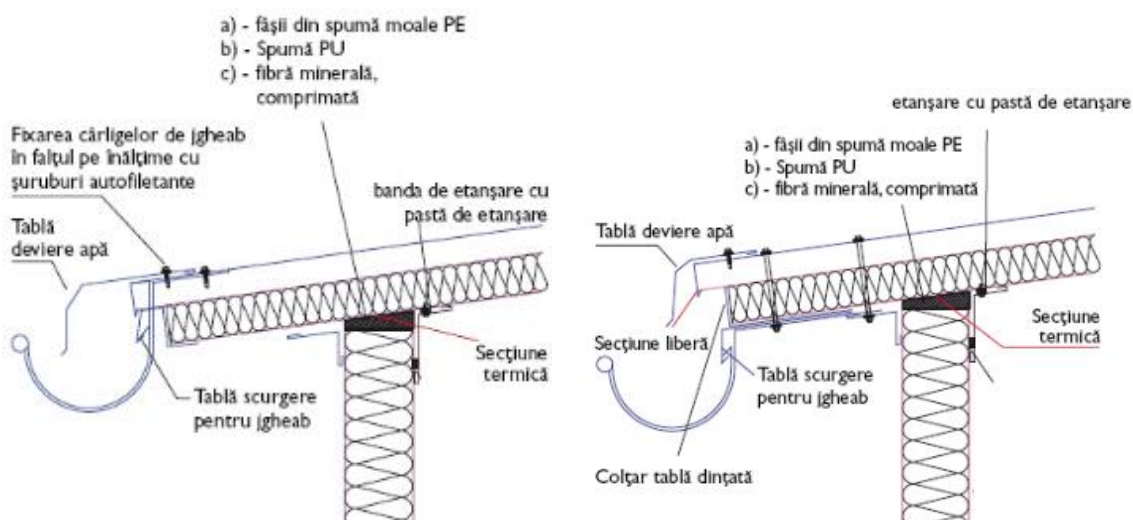


Fig. 2.16 Detalii de îmbinare panouri la streășină

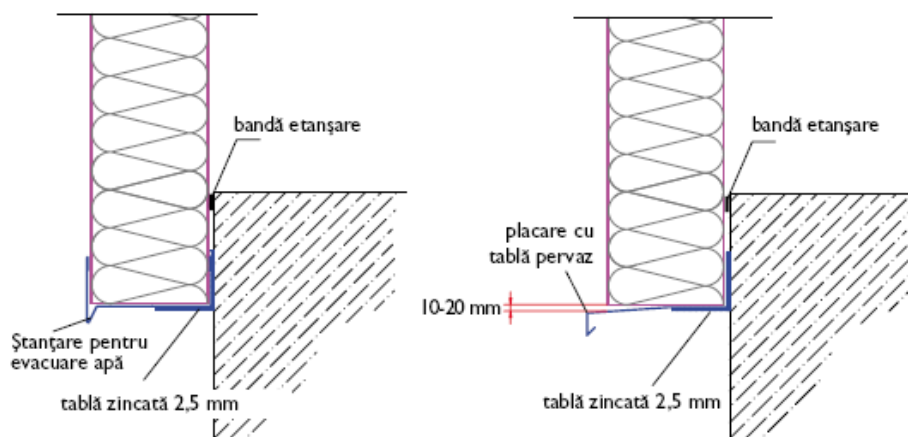


Fig. 2.17 Detalii de îmbinare panou perete cu placa pe sol

Pe piață se găsesc o mare diversitate de soluții constructive de închidere utilizate în mod curent la clădiri reale, ceea ce face necesară elaborarea unor studii termotehnice pentru aceste tipuri de detalii constructive, în vederea asigurării unui suport de lucru auditorilor energetici, inginerilor specialiști în inginerie civilă și arhitecților la evaluarea performanței termice a acestui tip de anvelopă.

2.5 Concluzii

Conform analizelor efectuate în ultimii ani la nivel mondial una dintre direcțiile majore de urmat este reducerea consumului de energie, iar unul dintre consumatorii principali fiind clădirile, este necesar ca eforturile să fie direcționate în vederea reducerii necesarului de energie printr-o conformare termică corespunzătoare.

Din perspectiva economiei de energie, domeniul clădirilor din sectorul terțiar este insuficient tratat în literatura de specialitate din România. Diversitatea mare a detaliilor constructive existente la ora actuală în ceea ce privește închiderile clădirilor din sectorul terțiar, în speță halele industriale, precum și metodologiile de calcul specifice sumare sau inexistente la nivel național, duc la necesitatea investigării comprehensive din punct de vedere energetic acestor tipuri de clădiri.

Cunoașterea unor probleme specifice acestor tipuri de clădiri, poate conduce la corectarea unor erori de proiectare și execuție actuale și la îmbunătățirea comportamentului lor în exploatare.

Capitol 3 Evaluarea performanței termice a panourilor compozite termoizolate cu înveliș metalic prin analiză numerică

3.1 Elemente teoretice pentru determinarea fluxului termic, a temperaturilor și a coeficienților liniari de transfer termic

3.1.1 Descrierea modelului matematic al programului utilizat în simularea numerică a câmpului termic bidimensional în regim termic staționar

Pentru evaluarea transferului termic, programul THERM 7.2, utilizează un model numeric bidimensional, care rezolvă ecuația căldurii prin metoda elementului finit.

Algoritmul de calcul cuprinde următorii pași:

1. Definierea modelului studiat prin: stabilire caracteristici geometrice, definire materiale utilizate, respectiv aplicare condiții de contur.
 - *Caracteristicile geometrice* se definesc conform standardului SR EN 10211:2017 [1], pe fiecare tip de detaliu studiat, inclusiv pentru elementele aflate în contact cu solul și se detaliază pentru fiecare tip de detaliu analizat;
 - Se definește fiecare material utilizat, fiind caracterizat de următoarele *proprietăți fizice de material*: conductivitate termică și emisivitate;
 - *Condițiile de contur* pentru suprafețele interioare cât și cele exterioare, sunt caracterizate de coeficientul de transfer termic superficial, care are atât o componentă convectivă, cât și o componentă radiativă.
2. Discretizarea în Elemente Finite

În programul THERM, generarea rețelei de discretizare se face automat, dar cu posibilitatea modificării acesteia. Rețeaua este formată dintr-un număr finit de elemente generate de un algoritm, Finite Quadtree [71]. Generatorul rețelei de discretizare, Finite Quadtree, se bazează pe o procedură de decompoziție spațială care reprezintă domeniul studiat printr-un obiect, definit ca un set de pătrate (denumite în continuare cadrante), care nu se suprapun, și care sunt stocate într-un arbore ierarhic. Obiectul care va fi discretizat este amplasat într-un contur închis. Conturul reprezintă “părintele”, care se subdivizează în patru cadrante “fiice”. Ceea ce rămâne din arbore, este apoi definit într-o manieră recursivă, prin subdivizare, până când toate cadrantele ating nivelul dictat de geometria detaliului analizat, respectiv până când fiecare element finit conține un singur tip de material. Pasul final al algoritmului este să convertească toate cadrantele în pătrate, respectiv triunghiuri, creând astfel rețeaua de discretizare a domeniului studiat.

3. Rezolvarea numerică a ecuațiilor de transfer termic

Rețeaua fiind creată este trimisă la modulul de rezolvare a elementelor finite Conrad [71].

Ecuația diferențială care se rezolvă numeric, caracteristică transferului termic bidimensional prin conducție (3-1), sub ipoteza că elementele sunt omogene și izotrope ($\lambda = \text{const.}$) este derivată din legea conservării energiei.

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_g = 0 \quad (3-1)$$

unde:

q_g – căldura generată de o sursă interioară de căldură

Magnitudinea vectorului flux termic normal la suprafața de contur, $q = q_f + q_c + q_r$, este dat prin legea lui Fourier pentru cazul bidimensional – eq. (3-2):

$$q_f + q_c + q_r = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) \quad (3-2)$$

Condițiile de contur sunt definite, fie ca și limite adiabatiche, fie prin următoarele formulări matematice ale fenomenelor fizice de transfer termic prin convecție și radiație la suprafață:

$q_f = 0$	condiții de contur adiabatiche
$q_c = \alpha_c \cdot (T - T_\infty)$	condiție de contur convecție interior idem exterior
$q_r = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4 - \alpha_i \cdot H_i$	condiții de contur radiație linearizată interior idem exterior

unde:

H_i – iradierea pe suprafața “i”, care este definită conform ecuației (3-3);

ε_i – emisivitatea suprafeței “i”;

σ – constanta Stefan – Boltzmann [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$].

$$H_i = \frac{1}{1 - \varepsilon_i} \cdot (B_i - \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4) \quad (3-3)$$

unde:

B_i – radianța pe suprafața “i”, care este definită conform ecuației (3-4);

B_j – radianța pe suprafața “j”, care vede suprafața “i”.

$$B_i = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \cdot \sum F_{ij} \cdot B_j \quad (3-4)$$

unde:

F_{ij} – factori de formă ai radiației (factori de vizare) – cât de mult din radiația emisă de o suprafață este receptat de o altă suprafață;

Factorii de formă ai radiației sunt calculați folosind metoda “cross-string” [71], ilustrată în Fig. 3.1 și calculați cu relația (3-5):

$$F_{ij} = \frac{r_{12} + r_{21} - (r_{11} + r_{22})}{2 \cdot L_i} \quad (3-5)$$

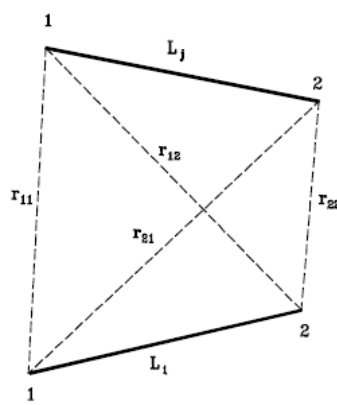


Fig. 3.1 Regula „Cross-String”

Pentru componenta radiativă a condițiilor de contur, în THERM se consideră ipoteza că segmentele de suprafață care radiază sunt gri și izoterme, așa că absorbția este egală cu emisivitatea, $\alpha_i = \varepsilon_i$.

Programul THERM realizează în mod automat analiza de element finit prin utilizarea metodei reziduurilor ponderate. Această metodă rezolvă o ecuație de forma (3-6):

$$\iint_{\Omega} W \cdot R \, dx dy = 0 \quad (3-6)$$

Funcția reziduală, R, rezultă când o aproximare a câmpului de temperatură este substituită în ecuația (3-1), având valoarea zero pentru valoarea exactă a câmpului de temperatură. În metoda reziduurilor ponderate, funcția reziduală este multiplicată cu o funcție de ponderare, W, iar apoi expresia rezultată se integrează. Forțând integrala să convergă spre zero (vezi relația (3-6)), se minimizează eroarea soluției aproximative. Așadar, metoda aplicată ecuației (3-1) duce la integrarea prin părți a ecuației (3-2), și substituind formulările matematice aferente condițiilor de contur se obține ecuația (3-7) [71].

$$\lambda \cdot \iint_{\Omega} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} - W \cdot q_g \right) dx dy + \int_{\Gamma_h} W \cdot \alpha_c \cdot (T - T_{\infty}) d\Gamma_h - \int_{\Gamma_r} W \cdot [\varepsilon_i \cdot \sigma \cdot (4 \cdot \bar{T}_i^3 \cdot T_i - 3 \cdot \bar{T}_i^4) - \alpha_i \cdot H_i] d\Gamma_r = 0 \quad (3-7)$$

unde:

Ω – se referă la analiză pe domeniu;

Γ – se referă la analiză pe contur.

Datorită componente radiative a condițiilor de contur, problema este neliniară și se aplică un procedeu iterativ pentru a obține soluția finală; termenul T_i^4 este linearizat utilizând primii doi termeni ai expansiunii seriilor Taylor după \bar{T}_i (temperatura iterației anterioare) [71].

Metoda “reziduurilor ponderate” utilizată în THERM se rezolvă printr-o formulare Galerkin, care constă în definirea unor funcții algebrice de formă, N_i . Pentru funcția de ponderare se consideră egalitatea $W = N_i$, iar pentru aproximarea câmpului de temperatură se consideră relația $T = N_i T_i$. Integrarea fiecărui element finit este aproximată printr-o integrare numerică utilizând Cuadratura Gaussiană de ordinul 2, unde punctele de integrare sunt conform cu Fig. 3.2.

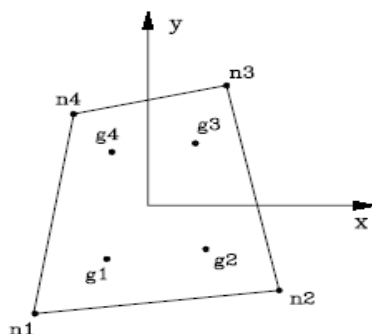


Fig. 3.2 Puncte de integrare pentru Cuadratura Gaussiană de ordinul doi [71]

Sistemul local de ecuații este combinat într-o matrice globală și soluția este obținută pentru fiecare nod, sub formă de temperaturi și flux termic.

După ce se obține soluția pentru rețeaua de discretizare inițială, este apelat modulul de estimare a erorilor pentru a se verifica convergența. Conceptual, procedura de verificare este descrisă astfel: unele puncte ale elementului au un ordin mai mare de convergență decât altele și sunt numite “puncte superconvergente”. Pentru elementele patrulater utilizate în modulul Conrad, punctele superconvergente coincid cu punctele de integrare Gaussiene [71]. Pentru îmbunătățirea soluției în fiecare nod al rețelei programul utilizează o metodă care să ajusteze o funcție la valorile gradientului punctelor superconvergente pentru elementele din jurul nodului. Se obține astfel o soluție mai bună pentru valoarea fluxurilor termice, q_{re} . Funcțiile de formă din problema inițială sunt apoi utilizate pentru a interpola soluțiile nodale, pentru a se obține soluții noi pentru fiecare element finit. Utilizând fluxurile recalculate, q_{re} , și fluxurile obținute inițial, q , se calculează contribuția la eroarea globală pentru fiecare element, conform ecuației (3-8).

$$\|e\| = (\int_{\Omega} (q_{re} - q)^T (q_{re} - q) d\Omega)^{1/2} \quad (3-8)$$

4. Verificarea erorilor

Dacă eroarea globală este mai mare decât o valoare specificată, atunci rețeaua de discretizare este redefinită în zonele din rețea unde potențialul erorii este ridicat. Cu rețeaua de discretizare redefinită se obține o nouă soluție. Acest proces continuă până când eroarea globală este mai mică decât valoarea de convergență. Procentul erorii este raportul dintre valoarea maximă a erorii, raportată la suma fluxurilor recalculate și înmulțită cu 100, conform relației (3-9) [71].

$$\% \text{Procentul erorii} = \frac{\|e\|}{\|q_{re}\|} \cdot 100 \quad (3-9)$$

5. Rezultate numerice

Rezultatele numerice obținute sunt de tipul câmp de temperaturi și flux termic, respectiv transmitanță termică corectată, U_{cor} [W/(m²K)] / rezistența termică corectată, R_{cor} [(m²K)/W], care însă nu pot fi utilizate direct în analiza pe element de anvelopă. Cu aceste valori determinate numeric cu programul THERM 7.2, printr-o metodă analitică, se determină coeficienții liniari de transfer termic, ψ [W/(mK)], care vor fi utilizați mai departe în analiza performanței termice a elementelor anvelopei clădirii.

3.1.2 Relații analitice pentru determinarea coeficienților liniari de transfer termic

Conform standardului SR EN ISO 10211:2017 [1], valorile coeficientului liniar de transfer termic se determină cu relația (3-10):

$$\Psi = L_{2D} - \sum_j U_j l_j \dots [W/(mK)] \quad (3-10)$$

unde:

L_{2D} – coeficientul de cuplaj termic obținut prin calculul 2-D al elementului care separă cele două medii ambiante considerate.

În vederea aplicării punctuale, relația se poate scrie sub forma (3-11) [72]:

$$\Psi = U_j \cdot l_j - U_j \cdot l_j = \frac{l_j}{R_j} - \frac{l_j}{R_j} \dots [W/(mK)] \quad (3-11)$$

Pentru detalii constructive mai complexe (cu elemente interioare, decroșuri, etc.), dar și pentru verificare, se poate utiliza relația (3-12) [72]:

$$\Psi = \frac{\Phi_{2D}}{\Delta T} - \frac{l_j}{R} [W/(mK)] \quad (3-12)$$

unde:

Φ_{2D} – flux termic în câmp bidimensional, pentru o suprafață având lățimea l_j și lungimea de 1 m [W/m];

ΔT – diferența de temperatură aplicată pe condițiile de contur, din mediul interior și cel exterior [K].

Pentru determinarea coeficienților liniari de transfer termic, la detaliile de simulare a transferului termic în sol, se utilizează relația analitică (3-13):

$$\Psi_g = L_{2D} - h_{per} \cdot U_{per} - L_{2D,a} \dots [W/(mK)] \quad (3-13)$$

unde:

h_{per} – distanța minimă de la intersecție la planul de secționare [m];

U_{per} – coeficientul de transmisie termică a peretelui (transmitanța termică) [W/(m²K)];

$L_{2D,a}$ – coeficient de cuplaj, determinat conform prevederilor SR EN ISO 10211:2017 (Opțiunea B) [W/K].

3.2 Condiții de analiză numerică a detaliilor constructive

3.2.1 Reguli de modelare ale geometriei detaliilor constructive analizate

Toate lungimile s-au măsurat prin raportarea la sistemul dimensional: dimensiuni interioare totale, definit conform Anexei B, SR EN 14683 [73].

Modelarea geometrică 2-D a detaliilor analizate s-a efectuat în conformitate cu prescripțiile SR EN ISO 10211:2017[1]. Detaliile analizate s-au secționat cu planuri adiabaticice la $d_{\min} = 1$ m față de poziția punții termice.

În ceea ce privește suprafețele înclinate, secționarea cu un plan adiabatic s-a efectuat la min. 1 m pe proiecția pe un plan orizontal al detaliului (Fig. 3.3) – cazul detaliilor constructive de îmbinare la coamă, respectiv de îmbinare panouri de acoperiș cu peretele.

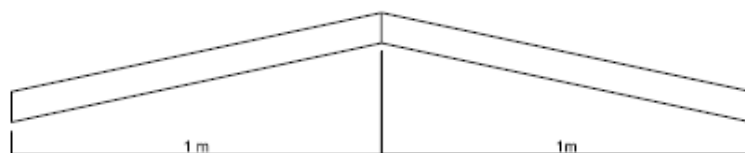


Fig. 3.3 Lungimea de secționare cu planuri adiabaticice – specificații SR EN 10211

Pentru detaliul de îmbinare cu suprafețele vitrate, zona vitrată s-a secționat cu un plan adiabatic la distanța de 19 cm, măsurată din punctul interior de intersecție cu tâmplăria – conform Anexei C, SR EN ISO 10077/2:2012 [74] – vezi Fig. 3.4.

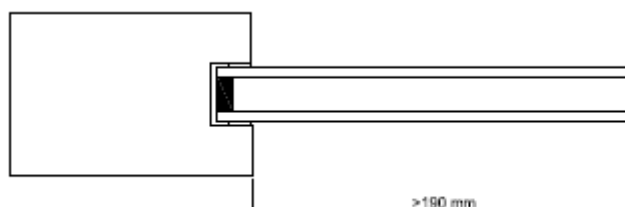


Fig. 3.4 Lungimea de secționare cu planuri adiabaticice zona ferestre – specificații SR EN10077

În ceea ce privește detaliile de îmbinare perete cu placa pe sol, modelarea geometrică s-a făcut cu următoarele dimensiuni, conform SR EN ISO 10211:2017, considerând dimensiunea caracteristică a planșeului $B > 8$ m și o înălțime a soclului de 40 cm:

- în interior: $\min\left(\frac{B}{2}, 4\right) = 4$ m;
- în exterior: $l = 20$ m;
- planul de secționare a peretelui deasupra cotei ± 0.00 m a plăcii pe sol: $l = 1$ m;
- limita inferioară model: $l = 20$ m, față de CTS.

3.2.2 Condiții de contur aplicate pe tip de detaliu

3.2.2.1 Rezistențe termice superficiale

Conform Anexei C, SR EN ISO 6946:2017 [75], se obțin cu relația (3-14):

$$R_s = \frac{1}{\alpha_c + \alpha_r} \dots [(m^2K)/W] \quad (3-14)$$

unde:

α_c – coeficientul de transfer termic superficial prin convecție.

Pentru suprafețele interioare, valorile α_{ci} sunt conform Tab. 3.1, iar pentru suprafețele exterioare α_{ce} se determină în funcție de viteza vântului (m/s), cu relația (3-15).

Tab. 3.1 Valorile coeficienților de transfer superficial prin convecție

Flux termic	ascendent	orizontal	descendent
α_{ci} [W/(m ² K)]	5.0	2.5	0.7

$$\alpha_{ce} = 4 + 4 \cdot v \quad (3-15)$$

α_r – coeficientul de transfer termic prin radiație, este definit conform relației (3-16):

$$\alpha_r = \varepsilon \cdot \alpha_{r0} \quad (3-16)$$

$$\alpha_{r0} = 4 \cdot \sigma \cdot T_{mn}^3 \quad (3-17)$$

unde:

ε – emisivitate suprafață [-];

α_{r0} – coeficient de radiație pentru o suprafață corp negru [W/(m²K)];

σ – constanta Stefan-Boltzmann [(5.67 x 10⁻⁸ W/(m²K⁴)];

T_{mn} – temperatura termodinamică medie a suprafeței și a mediului ambiant al acesteia.

Panourile termoizolate cu înveliș metalic de tip sandwich a căror performanță termică este studiată în acest capitol au un înveliș rigid din tablă din oțel galvanizat. Conform unor autori [76], valoarea emisivității de calcul pentru oțel galvanizat este de $\varepsilon = 0.28$. Astfel, pentru zonele metalice, cu α_{r0} estimat la 20°C, va rezulta $\alpha_{ri} = 1.596$ W/(m²K), respectiv pentru α_{r0} estimat la -10°C, va rezulta $\alpha_{re} = 1.148$ W/(m²K). În cadrul aceluiași studiu [76], se precizează că valoarea emisivității poate ajunge până la $\varepsilon = 0.88$ pentru oțel galvanizat învechit.

Astfel, valorile pentru rezistențele termice superficiale se modifică și pentru o valoare a emisivității egală cu $\varepsilon = 0.28$, aceste valori sunt calculate în Tab. 3.2.

Un studiu al influenței variației emisivității asupra transferului de căldură în regim staționar, pentru detalii constructive specifice panourilor compozite termoizolate cu înveliș metalic, în condiții de vară și de iarnă, este făcut de către autoare în [77].

Tab. 3.2 Valorile rezistențelor termice superficiale pentru valoarea emisivității specifică oțelului galvanizat nou

Rezistență termică superficială	Direcția fluxului termic		
	Vertical ascendent	Orizontal	Vertical descendent
[(m ² K)/W]			
R _{si}	0.151	0.244	0.435
R _{se}	0.047	0.047	0.047

Totuși, având în vedere variația mare a emisivității a oțelului galvanizat, valorile rezistențelor termice superficiale aplicate în analiza numerică a detaliilor constructive cu dimensiuni parametrizate, elaborată în subcap. 3.3 și subcap. 3.4, vor fi cele aferente unei valori a emisivității $\varepsilon = 0.9$, conform SR EN ISO 6946:2017 (vezi Tab. 3.3), mergându-se pe ipoteza că materialul pus în operă este expus condițiilor atmosferice și prafului, iar coroborat cu durata de viață a clădirii, mai degrabă va avea proprietățile unui material învechit decât cele rezultate imediat după producerea lui.

Tab. 3.3 Rezistențe termice superficiale pentru valoarea emisivității specifică oțelului galvanizat învechit

Rezistență termică superficială	Direcția fluxului termic		
	Ascendent de jos în sus	Orizontal	Descendent de sus în jos
[(m ² K)/W]			
R _{si}	0.10	0.13	0.17
R _{se}	0.04	0.04	0.04

Valorile pe direcția fluxului orizontal se aplică atunci când direcțiile fluxului termic fac un unghi de până la 30° cu planul orizontal.

3.2.2.2 Rezistența termică a spațiilor de aer

3.2.2.2.1 Cavități de aer în vitraje – conform prevederilor standardului ISO 15099:2003 [78], cavitatea de aer în vitraje se consideră un opac solid, căruia i se atribuie o conductivitate termică efectivă, calculată utilizând rezultatele unei analize a domeniului de vizibilitate, conform relației (3-18) [78].

$$\lambda_{\text{eff},i} = q_i \cdot \left(\frac{d_{gv,i}}{T_{ft,i} - T_{b,i-1}} \right) \quad (3-18)$$

unde:

$\lambda_{\text{eff},i}$ – conductivitatea termică efectivă [W/(mK)];

q_i – densitatea fluxului de căldură [W/m²];

$d_{gv,i}$ – grosimea cavității de aer [m];

$\Delta T_i = T_{ft,i} - T_{b,i-1}$ – diferența de temperatură pe conturul cavității de aer, între foile de sticlă [K].

3.2.2.2.2 Cavități de aer neventilat în profilele de tâmplărie – conform prevederilor standardului ISO 15099:2003 cavitata de aer neventilat se consideră un opac solid, căruia i se atribuie o conductivitate termică efectivă λ_{eff} (echivalentă – conf. nomenclator SR EN 10077), determinată cu relația (3-19).

$$\lambda_{\text{eff}} = (\alpha_c + \alpha_r) \cdot d \quad [\text{W}/(\text{mK})] \quad (3-19)$$

unde:

- λ_{eff} - conductivitatea termică efectivă [W/(mK)]
- α_c - coeficient de transfer termic convectiv [W/(m²K)]
- α_r - coeficient de transfer termic radiativ [W/(m²K)]
- d - dimensiunea cavității pe direcția fluxului termic [m]

Coeficientul de transfer termic convectiv se calculează cu ajutorul numărului lui Nusselt, Nu, care se determină în funcție de direcția, orientarea fluxului termic și de raportul dimensiunilor cavității (L_v/L_h) cu relația (3-20) [78].

$$\alpha_c = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_{\text{ai}}}{d} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (3-20)$$

unde:

- Nu – numărul lui Nusselt [-];
- λ_{ai} – conductivitatea termică a aerului [W/(mK)];
- d – grosimea cavității, pe direcția fluxului termic [m].

Pentru detaliile de îmbinare fereastră cu panou de perete, fluxul termic este orizontal și se utilizează cazul $\frac{L_v}{L_h} > 5$, $\text{Nu} = \max(\text{Nu}_1, \text{Nu}_2, \text{Nu}_3)$, unde Nu₁, Nu₂ și Nu₃ se determină cu relațiile (3-21), (3-22), respectiv (3-23) [78].

$$\text{Nu}_1 = \left\{ 1 + \left(\frac{0.104 \cdot \text{Ra}^{0.293}}{\left[1 + \left(\frac{6310}{\text{Ra}} \right)^{1.36} \right]} \right)^3 \right\}^{1/3} \quad [-] \quad (3-21)$$

$$\text{Nu}_2 = 0.242 \cdot \left(\text{Ra} \cdot \frac{L_h}{L_v} \right)^{0.273} \quad [-] \quad (3-22)$$

$$\text{Nu}_3 = 0.0605 \cdot \text{Ra}^{1/3} \quad [-] \quad (3-23)$$

unde:

- Ra – numărul lui Rayleigh [-].

Pentru cavitățile cu formă neregulată, prin respectarea proporționalităților: $\frac{L_1}{H_1} = \frac{L'_1}{H'_1}$ și $\frac{L_2}{H_2} = \frac{L'_2}{H'_2}$, geometria cavității se transformă într-o formă de patrulater regulat echivalent - conform SR EN ISO 10077:2 [74].

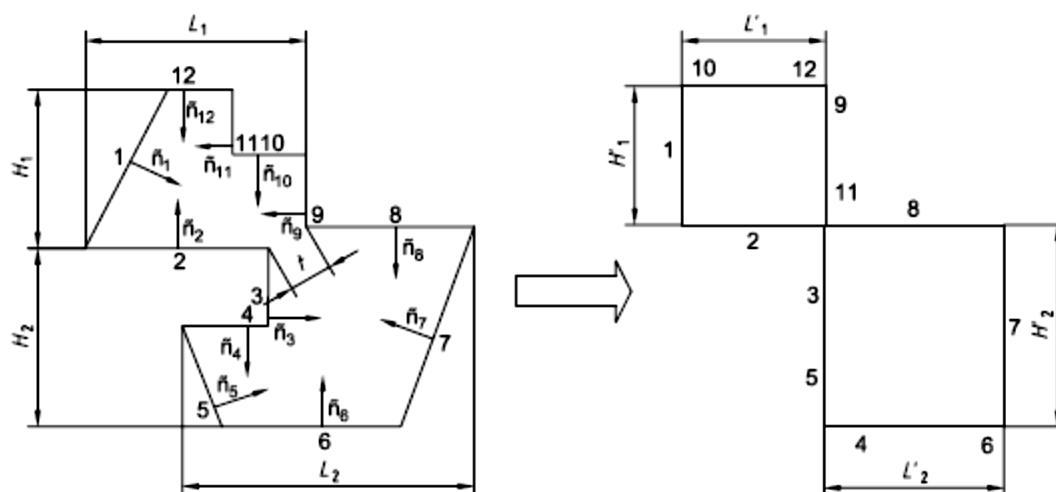


Fig. 3.5 Transformarea unei forme geometrice neregulate în patrulater regulat echivalente [78]

Direcția fluxului termic este luată în considerare în funcție de diferența absolută a temperaturilor calculată pe fețele verticale, respectiv pe fețele orizontale ale cavității echivalente obținute [78].

Coefficientul de transfer termic radiativ se calculează conform relației (3-24).

$$h_r = \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_{av}^3}{\frac{1}{\varepsilon_{cc}} + \frac{1}{\varepsilon_{ch}} - 2 + \frac{1}{\frac{1}{2} \left\{ \left[1 + \left(\frac{L_h}{L_v} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{L_h}{L_v} + 1 \right\}}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (3-24)$$

unde:

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ – constanta lui Stefan-Boltzmann [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$];

ε_{cc} , ε_{ch} – reprezintă emisivitatea suprafețelor opuse ale cavității, pe direcția normală fluxului termic [-];

L_h , L_v – dimensiunile cavității [m];

T_{av} – temperatura medie [K].

$$T_{av} = \frac{T_{cc} + T_{ch}}{2} \quad [\text{K}] \quad (3-25)$$

T_{cc} – temperatura pe fața rece a cavității [K]

T_{ch} – temperatura pe fața caldă a cavității [K]

Necunoscându-se inițial, temperaturile T_{cc} și T_{ch} , se intră în calcul cu $T_{ch} = 10^\circ\text{C}$ și $T_{cc} = 0^\circ\text{C}$. După ce simularea e făcută, se verifică pentru fiecare cavitate neventilată ca valoarea conductivității echivalente să se calculeze pentru o diferență de temperatură $< 1^\circ\text{C}$.

3.2.2.2.3 *Interstiții parțial ventilate cu secțiuni transversal reduse.* În unele detalii (detaliu îmbinare panou perete cu placa pe sol, detaliu îmbinare panouri de acoperiș la coamă), apar zone care comunică cu exteriorul prin fante cu dimensiuni care nu depășesc 10 mm, astfel pentru aceste zone se aplică prevederile din SR EN ISO 10077-2:2012, zonele putând fi tratate

ca și cavități slab ventilate, iar coeficientul de conductivitate termică echivalentă este dublu față de acela al unei cavități neventilate, cu aceleași dimensiuni.

În detaliile constructive analizate numeric aerul este luat în considerare prin utilizarea acestor modele comprehensive, cu determinarea conductivităților termice echivalente pentru fiecare cavitate.

3.2.3 Temperaturi de calcul și caracteristici termotehnice ale materialelor utilizate

3.2.3.1 Temperaturi de calcul

În vederea determinării coeficienților liniari de transfer termic, respectiv a câmpului de temperaturi, temperaturile la limită utilizate în analiza numerică în regim staționar sunt:

$T_i = 20\text{ }^\circ\text{C}$ - temperatura interioară;

$T_e = -18\text{ }^\circ\text{C}$ - temperatura exterioară.

Aceste condiții de simulare sunt aferente zonei climatice III din țara noastră.

Planurile de decupaj care se aplică pe conturul detaliilor, sunt adiabatică. De asemenea, se face precizarea că în detaliile de modelare a transferului prin sol, la partea inferioară a modelului de calcul se aplică limită adiabatică.

3.2.3.2 Caracteristici termotehnice materiale

Conductivitățile termice de calcul ale materialelor utilizate în detaliile constructive analizate în acest capitol sunt prezentate în Tab. 3.4.

Tab. 3.4 Conductivități termice de calcul utilizate pentru materiale de construcții și sol

Element de construcție	Materiale utilizate	λ [W/(mK)]
Panouri sandwich	Oțel galvanizat	58
	Poliuretan rigid celular	0.038
	Bandă din cauciuc	0.25
Placa pe sol	Beton armat	1.74
	Pietriș	0.70
	Strat de pământ (până la adâncimea 20 m, măsurată de la CTS)	2.00
	XPS (polistiren extrudat)	0.042
Ferestre 4-16-4, fără pelicule aplicate	Tâmplărie PVC (policlorură de vinil) rigidă	0.17
	Sticlă float	1.00
	Oțel inoxidabil	0.17
	Garnitură EPDM	0.25
	Silicagel	0.13
	Aluminiu	160
	Poliuretan rigid (sigilatură)	0.25

3.3 Analiza numerică a unor detalii de îmbinări între elementele anvelopei clădirii

3.3.1 Detaliu de îmbinare panouri de perete la colț

Pentru a asigura posibilitatea efectuării unei analize a performanței termice la nivel de element de anvelopă clădire (de ex. calcul pe fațadă, calcul la nivel de planșeu de acoperiș) cu soluția de închidere de panouri termoizolate cu înveliș metalic de tip sandwich, s-au analizat principalele detalii constructive caracteristice anvelopei unei clădiri.

Primul detaliu constructiv analizat este detaliul de îmbinare la colț al panourilor de perete. Astfel, s-a calculat numeric detaliul cu geometria din Fig. 3.6, rezultatele obținute fiind prezentate în Fig. 3.7, Fig. 3.8 și Tab. 3.5.



Fig. 3.6 Detaliu modelare geometrică îmbinare între panouri de perete - la colț

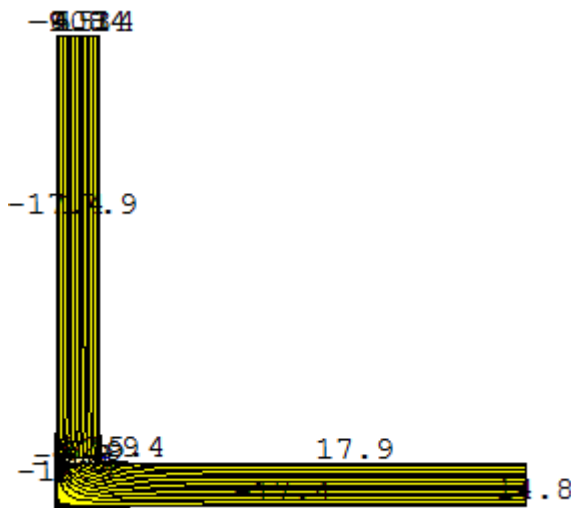


Fig. 3.7 Linii izoterme detaliu 3.3.1

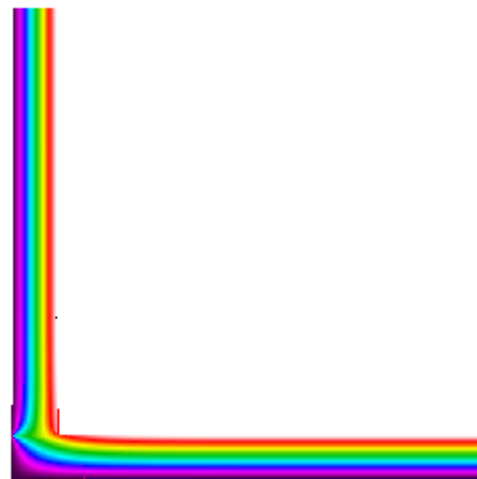


Fig. 3.8 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.1

Tab. 3.5 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul de îmbinare între panouri de perete - la colț

Detaliu îmbinare panouri de perete la colț	$\delta_{\text{termoiz.}}$	Φ_{2D}	R	R'	L_i	Ψ
	[mm]	[W]	[m ² K/W]	[m ² K/W]	[m]	[W/mK]
Zona panou perete stg.	60	23.312	1.746	1.636	1.00	0.039
Zona panou perete dr.	60	24.881	1.746	1.533	1.00	0.080
Zona panou perete stg.	80	18.332	2.272	2.080	1.00	0.041
Zona panou perete dr.	80	19.868	2.272	1.920	1.00	0.081
Zona panou perete stg.	100	15.137	2.799	2.516	1.00	0.040
Zona panou perete dr.	100	16.611	2.799	2.292	1.00	0.079
Zona panou perete stg.	120	23.312	3.325	2.932	1.00	0.039
Zona panou perete dr.	120	24.881	3.325	2.640	1.00	0.080

3.3.2 Detalii de îmbinări orizontale între panouri de perete

3.3.2.1 Detaliu îmbinare orizontală panouri de perete

Specific panourilor termoizolate cu înveliș metalic sunt îmbinările între panouri de perete, de regulă la modul de 1.00 m pe lățimea panoului, îmbinări care pot fi orizontale sau verticale. În Fig. 3.9 este prezentată o îmbinare orizontală, a cărei detaliu de modelare geometrică a îmbinării este prezentat în Fig. 3.10, iar rezultatele simulării sunt prezentate sub formă grafică în Fig. 3.11 și Fig. 3.12, respectiv sub formă numerică în Tab. 3.6.

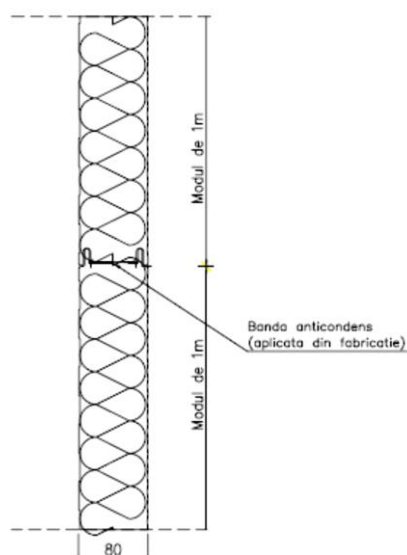


Fig. 3.9 Detaliu îmbinare orizontală panouri de perete

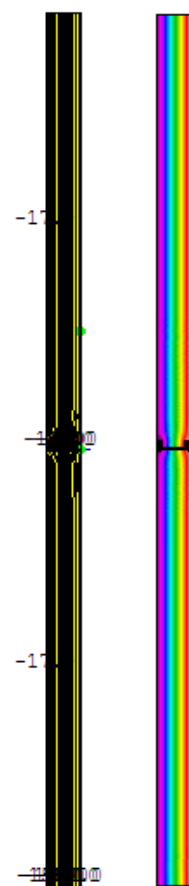
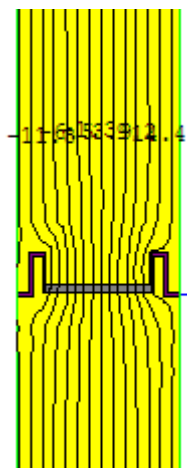
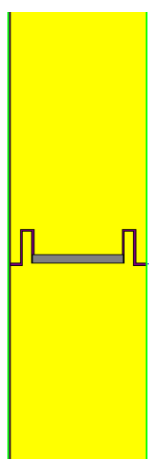


Fig. 3.10 Detaliu modelare geom. Fig. 3.11 Linii izoterme det. 3.3.2.1 Fig. 3.12 Suprafețe izoterme det. 3.3.2.1

Tab. 3.6 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare orizontală între panouri de perete

Detaliu îmbinare oriz. panouri de perete	$\delta_{\text{termoiz.}}$	Φ_{2D}	R	R'	L_i	Ψ
	[mm]	[W]	[(m ² K)/W]	[(m ² K)/W]	[m]	[W/(mK)]
Perete exterior (jos)	60	22.45	1.746	1.693	1.00	0.018
Perete exterior (sus)	60	22.38	1.746	1.698	1.00	0.016
Perete exterior (jos)	80	17.17	2.272	2.213	1.00	0.012
Perete exterior (sus)	80	17.11	2.272	2.221	1.00	0.010
Perete exterior (jos)	100	14.11	2.799	2.693	1.00	0.014
Perete exterior (sus)	100	14.05	2.799	2.705	1.00	0.012
Perete exterior (jos)	120	12.03	3.325	3.160	1.00	0.016
Perete exterior (sus)	120	11.98	3.325	3.173	1.00	0.014

Pentru detaliul de îmbinare orizontal între panouri de perete valoarea coeficienților liniari de transfer termic este redusă.

3.3.2.2 Detaliu îmbinare orizontală panouri perete – îmbinare ascunsă

S-a simulat un detaliu curent de îmbinare panouri cu îmbinare ascunsă. În modelarea geometrică a detaliului s-a eliminat șurubul de prindere (vezi Fig. 3.13), iar pentru zona “ascunsă” s-a calculat o conductivitate termică echivalentă a cavității de aer neventilat.

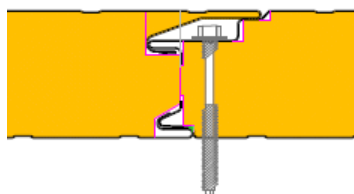


Fig. 3.13 Detaliu îmbinare ascunsă panouri de perete

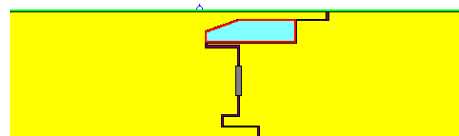


Fig. 3.14 Detaliu modelare geometrică



Fig. 3.15 Linii izoterme detaliu 3.3.2.2

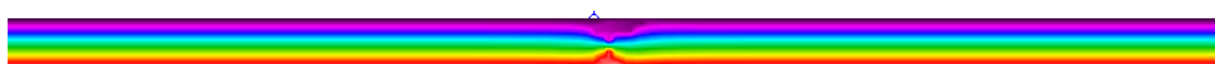


Fig. 3.16 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.2.2

Tab. 3.7 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare ascunsă între panouri de perete

Detaliu îmbinare oriz. panouri de perete	$\delta_{\text{termoiz.}}$	Φ_{2D}	R	R'	L_i	Ψ
	[mm]	[W]	[m ² K/W]	[m ² K/W]	[m]	[W/mK]
Perete exterior (stg.)	80	17.52	2.272	2.169	1.00	0.021
Perete exterior (dr.)	80	17.59	2.272	2.170	1.00	0.023

Rezultatele obținute pentru panourile cu grosime de 80 mm au valori mai mari ai coeficienților ψ raportat la primul tip de îmbinare analizat, dar și aceste valori obținute sunt mici. Pentru alte grosimi ale acestui tip de îmbinare nu s-a făcut simulare numerică, din lipsa detaliilor tehnice.

3.3.3 Detaliu de îmbinare panou de perete cu panou de acoperiș

Acest detaliu constă în îmbinarea dintre un panou de perete și un panou de acoperiș, cu panta acoperișului de min. 7°. Secțiunea termică s-a simulat în varianta cu material termoizolant cu conductivitatea termică $\lambda = 0.05 \text{ W/(mK)}$.

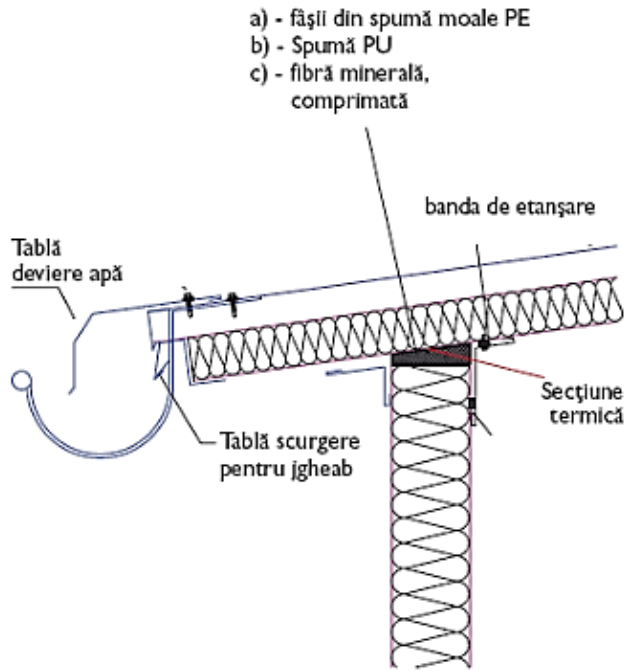


Fig. 3.17 Det. îmbinare panou de perete cu panou de acoperiș

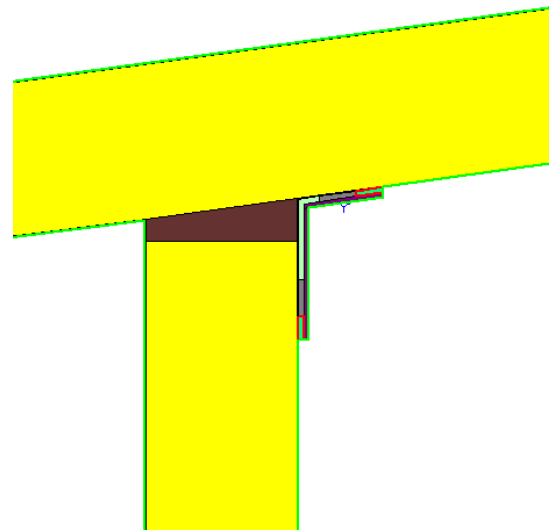


Fig. 3.18 Detaliu modelare geometrică

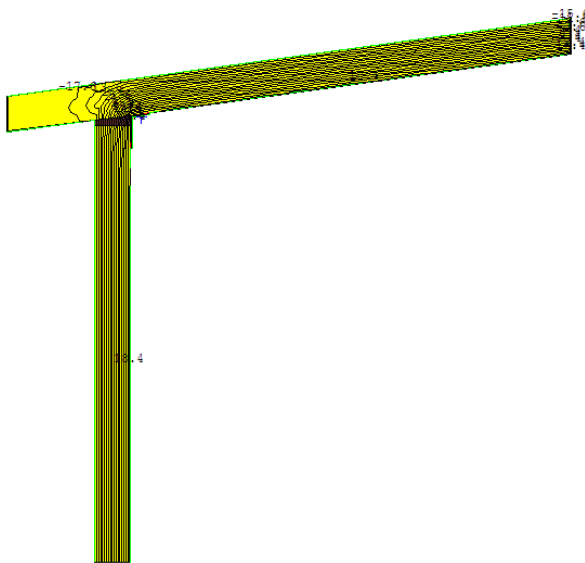


Fig. 3.19 Linii izoterme detaliu 3.3.3

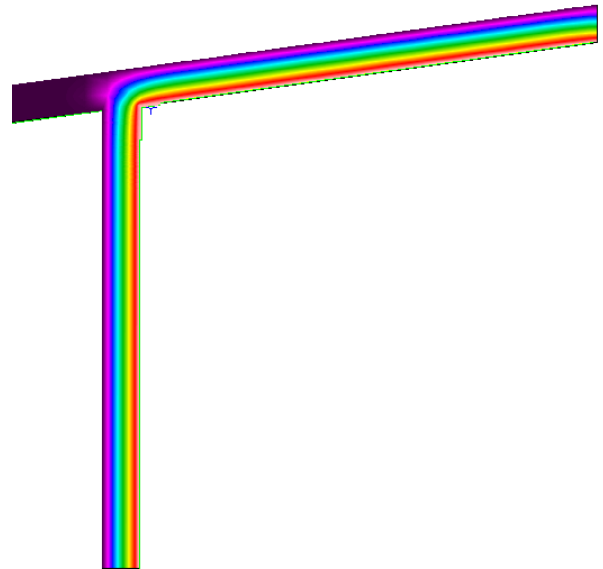


Fig. 3.20 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.3

Tab. 3.8 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare perete cu acoperiș

Detaliu îmbinare panou perete cu panou de acoperiș	$\delta_{\text{termoiz.}}$	Φ_{2D}	R	R'	L_i	Ψ
	[mm]	[W]	[(m ² K)/W]	[(m ² K)/W]	[m]	[W/(mK)]
Panou de acoperiș	60	22.74	1.721	1.697	1.00	0.009
Perete exterior	60	22.34	1.746	1.737	1.00	0.003
Pano de acoperiș	80	17.74	2.247	2.175	1.00	0.011
Perete exterior	80	17.24	2.272	2.250	1.00	0.004
Panou de acoperiș	100	14.37	2.774	2.685	1.00	0.013
Perete exterior	100	14.06	2.799	2.759	1.00	0.005
Panou de acoperiș	120	12.17	3.300	3.171	1.00	0.015
Perete exterior	120	11.89	3.325	3.263	1.00	0.006

Valorile obținute pentru coeficientul liniar de transfer termic sunt foarte reduse. Pentru această variantă de detaliu, efectul de punte termică geometrică și de material este aproape inexistent.

3.3.4 Detaliu de îmbinare tâmplărie PVC cu panou de perete

În studiile întreprinse în acest capitol se urmărește determinarea coeficienților liniari de transfer termic liniar rezultat în urma analizei bidimensionale a câmpului termic. În consecință, din detaliul următor s-a omis prinderea mecanică cu șuruburi a tâmplăriei de profilul C și de panoul de perete, având în vedere că aceasta reprezintă o punte termică punctuală, pentru aceste zone din pereți fiind necesare analize tridimensionale a câmpului termic (vezi Fig. 3.21).

Cavitățile de aer din interiorul profilului PVC s-au considerat cavități de aer neventilat.

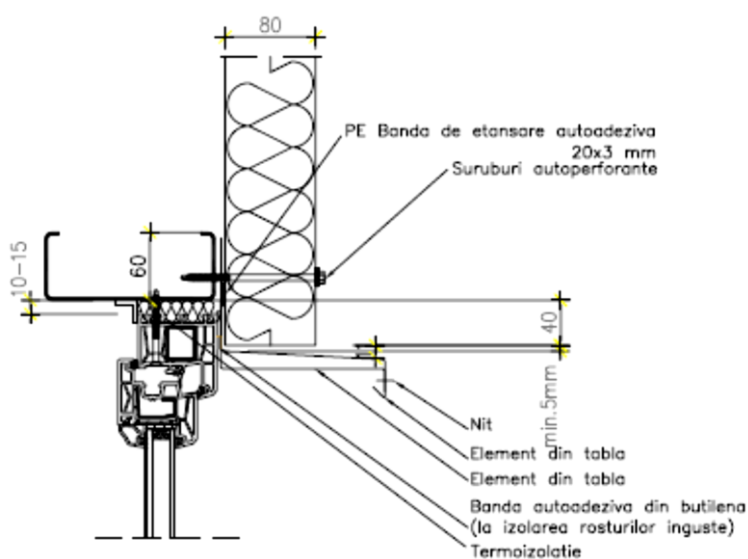


Fig. 3.21 Detaliu de îmbinare panou de perete cu fereastra

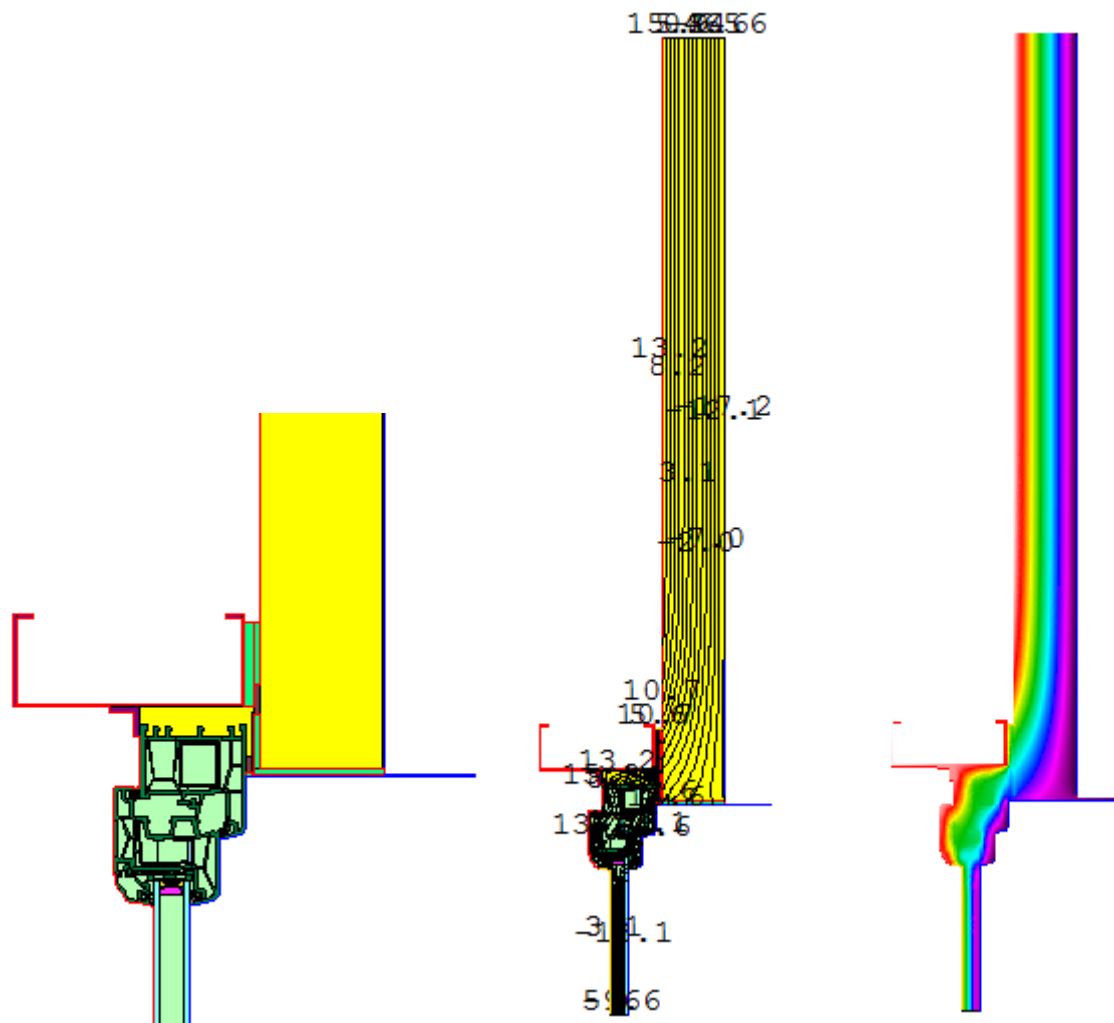


Fig. 3.22 Detaliu modelare geom. Fig. 3.23 Linii izoterme det. 3.3.4 Fig. 3.24 Suprafețe izoterme det. 3.3

Tab. 3.9 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare perete cu fereastra

Detaliu îmbinare panou perete cu fereastra zona buiandrug	$\delta_{\text{termoiz.}}$	Φ_{2D}	ΔT	R	R'	L_i	Ψ
	[mm]	[W]	[K]	[m ² K/W]	[m ² K/W]	[m]	[W/mK]
Perete exterior	60	25.66	38	1.746	1.340	1.00	0.157
Perete exterior	80	21.30	38	2.272	1.614	1.00	0.162
Perete exterior	100	18.60	38	2.799	1.849	1.00	0.166
Perete exterior	120	16.77	38	3.325	2.051	1.00	0.169

În urma simulării acestui detaliu se observă că valoarea coeficientului liniar de transfer termic în perete este relativ mare, iar influența punților termice asupra panoului de perete crește odată cu creșterea grosimii termoizolației.

3.3.5 Detaliu de îmbinare panou de perete cu placa pe sol

3.3.5.1 Detaliu de îmbinare panou de perete cu placa pe sol - tip 1

În urma modelării numerice în THERM a detaliului constructiv din Fig. 3.25, respectând regulile de modelare geometrică (Fig. 3.26) indicate în subcapitolul 3.2.1, rezultatele obținute sunt prezentate sub formă grafică în Fig. 3.27 și Fig. 3.28, respectiv sub formă numerică în Tab. 3.10. Se face precizarea că toate zonele interstițiale din acest detaliu constructiv cu o fantă spre interior sau exterior mai mică de 10 mm s-au considerat cavități de aer slab ventilat.

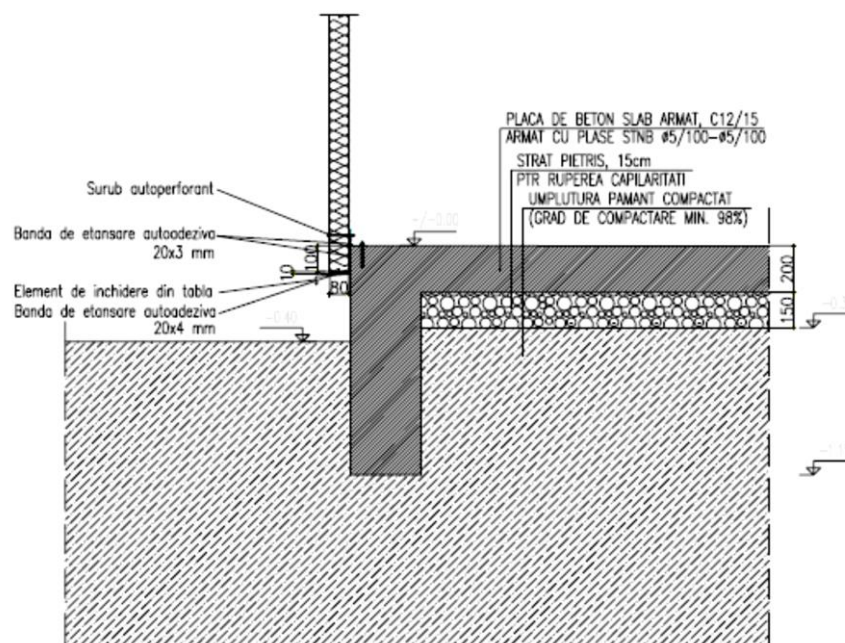


Fig. 3.25 Detaliu prindere panou perete de grindă de fundare

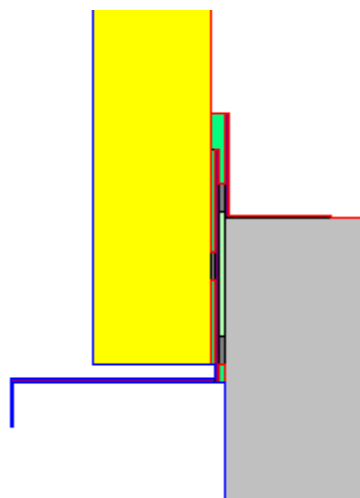


Fig. 3.26 Detaliu modelare geometrie zone interstițiale

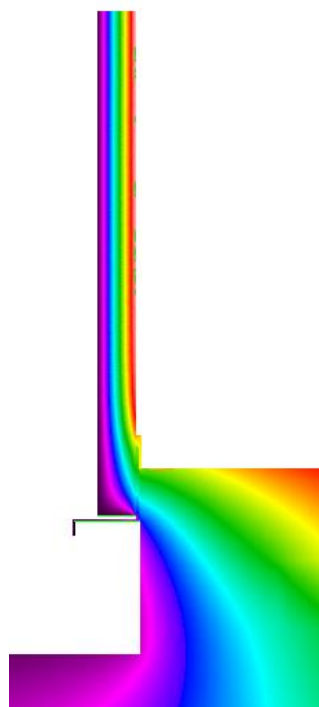
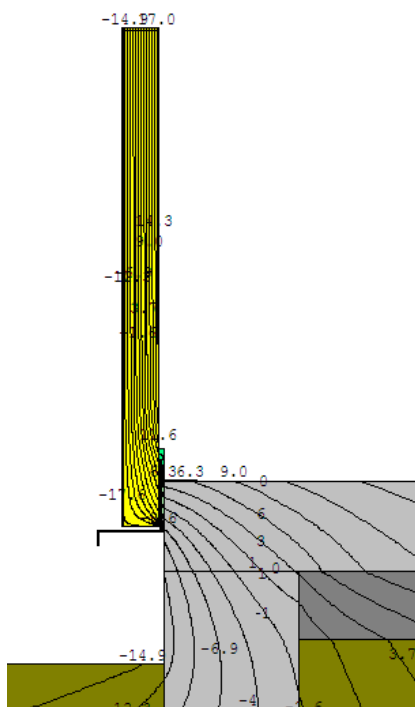


Fig. 3.27 Linii izoterme detaliul 3.3.5.1

Fig. 3.28 Suprafețe izoterme detaliul 3.3.5.1

Tab. 3.10 Coeficienții liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare perete cu placa pe sol – tip 1

Tip elem.	$\delta_{\text{termoiz.}}$	Φ_{2D}	ΔT	L_{2D}	h_w	U_w	$L_{2D,a}$	Ψ_{detaliu}	ψ
[-]	[mm]	[W]	[K]	[W/K]	[m]	[W/m ² K]	[W/K]	[W/mK]	[W/mK]
Perete	60	36.137	38	0.951	1.00	0.573	2.011	1.124	0.343
Placa sol	--	106.104	38	2.792	-	-			0.781
Perete	80	31.600	38	0.832	1.00	0.440	2.011	1.142	0.364
Placa sol	--	105.995	38	2.789	-	-			0.778
Perete	100	28.781	38	0.757	1.00	0.357	2.011	1.154	0.378
Placa sol	--	105.931	38	2.788	-	-			0.776
Perete	120	26.861	38	0.707	1.00	0.301	2.011	1.163	0.388
Placa sol	--	105.890	38	2.787	-	-			0.775

Conform rezultatelor numerice și analitice obținute rezultă că prinderea în zona câmpului curent a panoului de perete cu placa pe sol și grinda de fundare, cu o suprapunere de 10 cm cu placa de beton și fără termoizolația soclului este insuficientă, având în vedere valorile mari obținute pentru coeficienții liniari de transfer termic. Se remarcă creșterea efectului de punte termică în perete odată cu creșterea grosimii termoizolației în panou.

3.3.5.2 Detaliu de îmbinare panou de perete cu placa pe sol – tip 2

S-a simulat numeric și un alt tip de detaliu, cu o suprapunere pe elementul din beton armat de 6 cm, cu un tip de prindere mai simplu – vezi Fig. 3.29

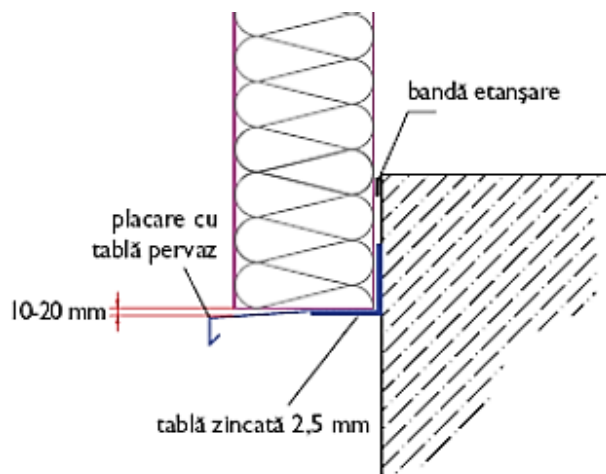


Fig. 3.29 Detaliu îmbinare panou perete cu placa pe sol – tip 2

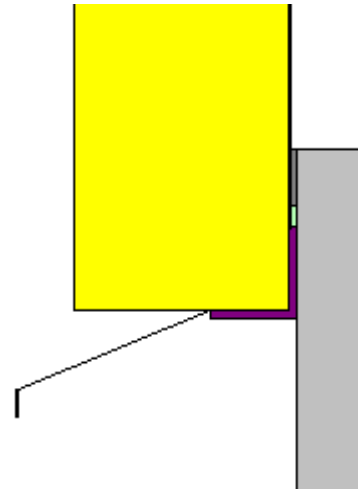


Fig. 3.30 Modelare geom. detaliu 3.3.5.2

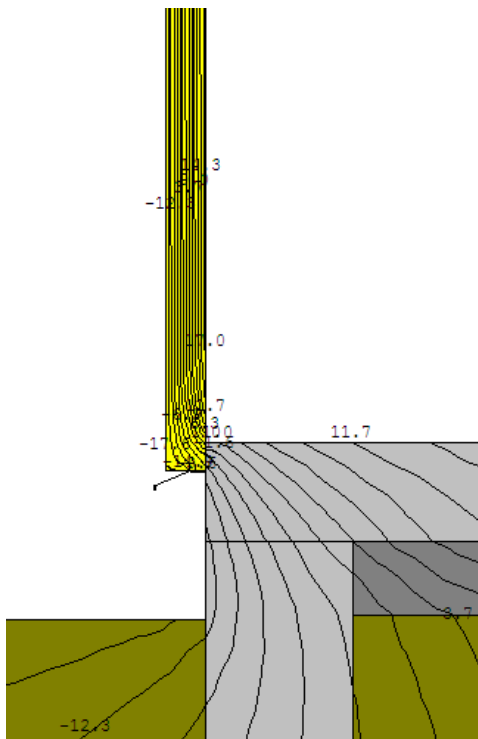


Fig. 3.31 Linii izoterme detaliu 3.3.5.2

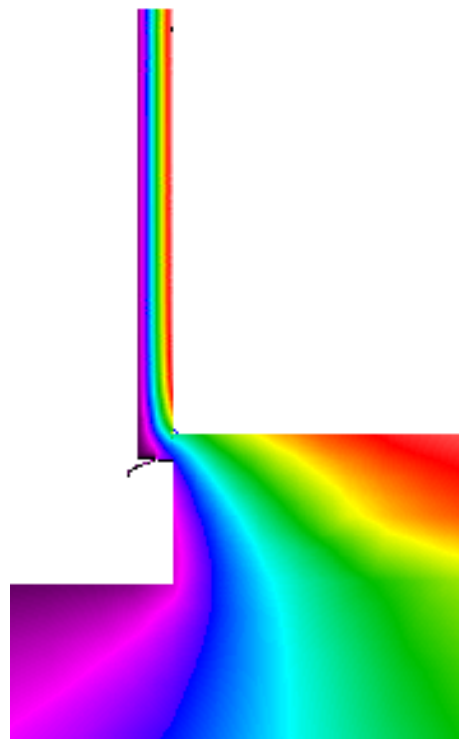


Fig. 3.32 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.5.2

Tab. 3.11 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare perete cu placa pe sol – tip 2

Tip elem.	$\delta_{\text{termoiz.}}$	Φ_{2D}	ΔT	L_{2D}	h_w	U_w	$L_{2D.a}$	Ψ_{detaliu}	Ψ
[-]	[mm]	[W]	[K]	[W/K]	[m]	[W/m ² K]	[W/K]	[W/mK]	[W/mK]
Perete	60	30.624	38	0.806	1.00	0.573	2.002	1.134	0.233
Placa sol	60	110.310	38	2.903	-	-			0.900
Perete	80	25.929	38	0.682	1.00	0.440	2.002	1.141	0.242
Placa sol	80	110.248	38	2.901	-	-			0.899
Perete	100	23.022	38	0.606	1.00	0.357	2.002	1.146	0.249
Placa sol	100	110.216	38	2.900	-	-			0.898
Perete	120	21.049	38	0.554	1.00	0.301	2.002	1.151	0.253
Placa sol	120	110.195	38	2.900	-	-			0.897

Față de modelul studiat anterior, se observă o majorare a fluxului termic pentru acest tip de detaliu (cu o majorare a coeficienților liniari de transfer termic aferenți plăcii pe sol, respectiv o reducere a celor aferenți panourilor de perete), ceea ce sugerează influența lungimii de suprapunere a panoului pe elementul de beton armat. Totodată, reducerea fluxului termic prin panoul de perete, poate fi asigurată și de către prinderea panoului de placă, mai eficientă din punct de vedere energetic. Se remarcă aceeași tendință de creștere a efectului de punte termică în perete odată cu creșterea grosimii termoizolației în panou.

Aceste observații se fac în vederea pre-identificării unor soluții de optimizare ale detaliului (dezvoltate în subcap. 3.4), pe principiul identificării cauzei care produce efecte, în vederea eliminării ei pentru reducerea efectelor.

3.3.6 Detaliu de îmbinare panouri acoperiș la coamă

Pentru detaliu de îmbinare la coamă, s-a studiat detaliul din Fig. 3.33, dar se face precizarea că s-au găsit detalii în practica curentă de rezolvare a îmbinării la coamă fără asigurarea continuității termoizolației, deci fără propunerea aplicării de termoizolație in situ.

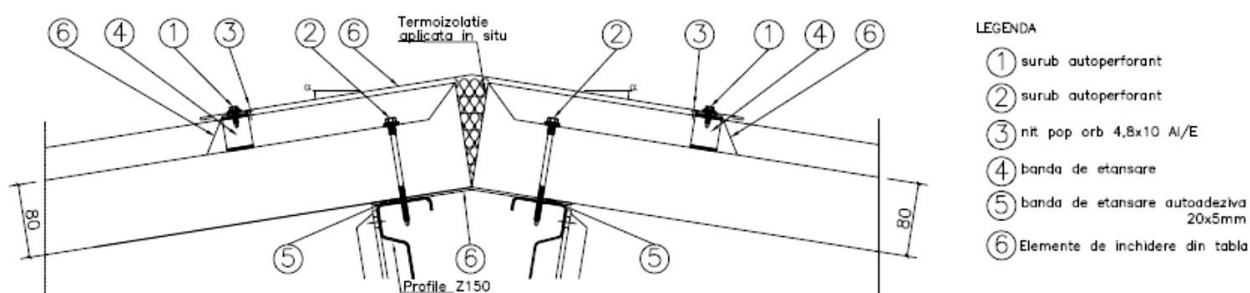


Fig. 3.33 Detaliu de îmbinare panouri acoperiș, la coamă

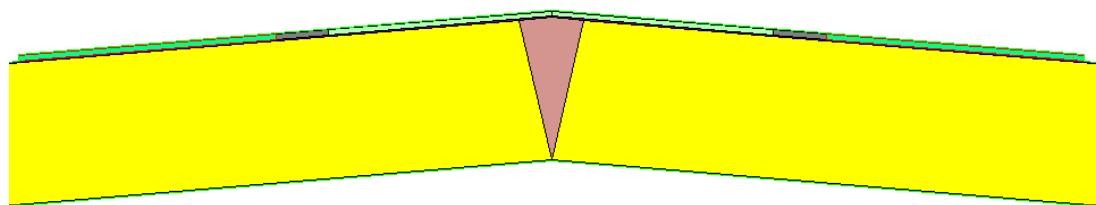


Fig. 3.34 Modelare geometrică - detaliu protecție hidroizolație la coamă

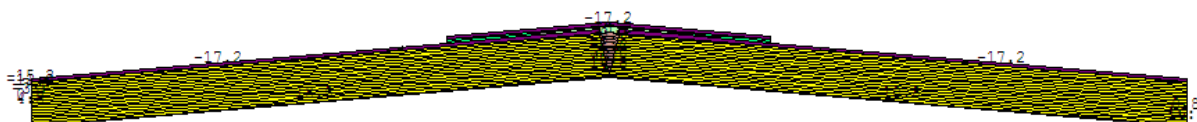


Fig. 3.35 Linii izoterme detaliu 3.3.6

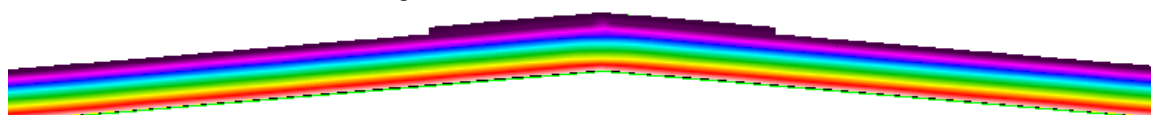


Fig. 3.36 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.6

Tab. 3.12 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul îmbinare panouri de acoperiș la coamă

Detaliu îmbinare panouri de acoperiș la coamă	$\delta_{\text{termoiz.}}$	Φ_{2D}	R	R'	L_i	Ψ
	[mm]	[W]	[m ² K/W]	[m ² K/W]	[m]	[W/mK]
Panou acoperiș (stg.)	60	23.52	1.721	1.728	1.00	- 0.002
Panou acoperiș (dr.)	60	23.52	1.721	1.728	1.00	- 0.002
Panou acoperiș (stg.)	80	18.06	2.248	2.251	1.00	- 0.001
Panou acoperiș (dr.)	80	18.06	2.248	2.251	1.00	- 0.001
Panou acoperiș (stg.)	100	14.65	2.774	2.774	1.00	0.000
Panou acoperiș (dr.)	100	14.65	2.774	2.774	1.00	0.000
Panou acoperiș (stg.)	120	12.33	3.300	3.296	1.00	0.000
Panou acoperiș (dr.)	120	12.33	3.300	3.296	1.00	0.000

În varianta de asigurare a continuității termoizolației, cu aplicare în situ după poziționarea panourilor la panta proiectată, se poate remarca în Tab. 3.12 că valorile coeficienților liniari de transfer termic sunt neglijabile.

3.3.7 Detalii de îmbinare între panouri de acoperiș

3.3.7.1 Detaliu de îmbinare între panouri de acoperiș – tip 1

Tot specific panourilor termoizolate cu înveliș metalic sunt îmbinările între panouri de acoperiș, de regulă la modul de 1.00 m pe lățimea panoului. În Fig. 3.37 este prezentat un tip de detaliu de modelare geometrică a îmbinării, iar rezultatele simulării sunt prezentate sub formă grafică în Fig. 3.38 și Fig. 3.39, respectiv sub formă numerică în Tab. 3.13.

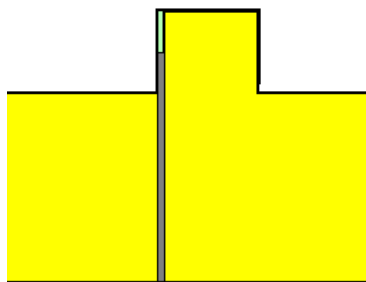


Fig. 3.37 Detaliu modelare geometrică

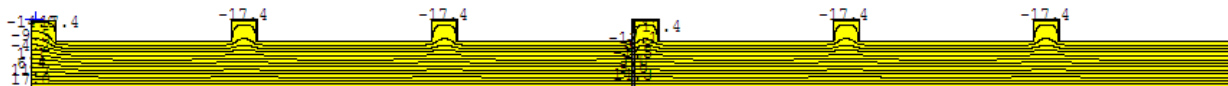


Fig. 3.38 Linii izoterme detaliu 3.3.7.1



Fig. 3.39 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.7.1

Tab. 3.13 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul de îmbinare între panouri de acoperiș

Detaliu îmbinare panouri de acoperiș	$\delta_{\text{termoiz.}}$	Φ_{2D}	R	R'	L_i	Ψ
	[mm]	[W]	[m ² K/W]	[m ² K/W]	[m]	[W/mK]
Panou acoperiș (stg.)	60	21.88	1.738	1.733	1.00	0.002
Panou acoperiș (dr.)	60	21.93	1.738	1.723	1.00	0.005
Panou acoperiș (stg.)	80	16.81	2.264	2.245	1.00	0.002
Panou acoperiș (dr.)	80	16.90	2.264	2.255	1.00	0.004
Panou acoperiș (stg.)	100	13.65	2.791	2.779	1.00	0.002
Panou acoperiș (dr.)	100	13.72	2.791	2.766	1.00	0.003
Panou acoperiș (stg.)	120	11.50	3.317	3.297	1.00	0.002
Panou acoperiș (dr.)	120	11.54	3.317	3.287	1.00	0.003

Se face precizarea că pentru ambele tipuri de detalii de îmbinare între panouri de acoperiș analizate în acest studiu, în determinarea fluxului termic “neperturbat” (din relația de determinare a coeficientului ψ), însă ca să se țină cont de existența vutelor în structura panoului, acesta a fost determinat printr-o simulare numerică bidimensională adițională pe un element bisimetric care conține o vută (vezi Fig. 3.40). Valorile obținute sunt trecute în coloana lui R din Tab. 3.13 și Tab. 3.14.

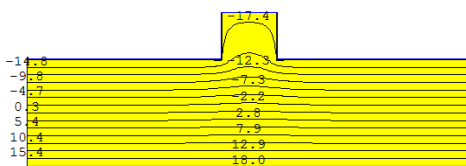


Fig. 3.40 Model numeric adițional pentru determinarea rezistenței termice a panoului de acoperiș fără influența punții termice principale analizate

3.3.7.2 Detaliu de îmbinare între panouri de acoperiș – tip 2

În practica uzuală s-au întâlnit panouri la care tabla metalică este continuă în zona de îmbinare (vezi Fig. 3.41), astfel s-a simulat numeric și un asemenea detaliu de îmbinare panouri de acoperiș. Rezultatele obținute sunt prezentate sub formă grafică în Fig. 3.42 și Fig. 3.43, respectiv numeric în Tab. 3.14.

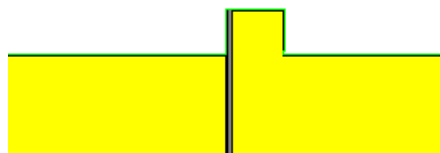


Fig. 3.41 Detaliu modelare geometrică îmbinare între panouri de acoperiș – tip 2

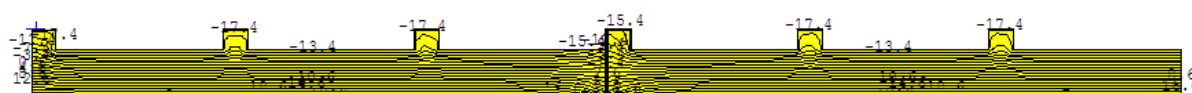


Fig. 3.42 Linii izoterme detaliu 3.3.7.2

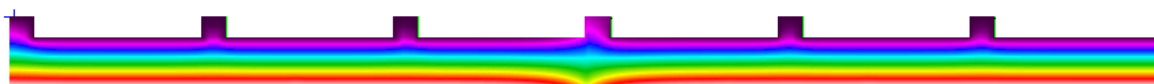


Fig. 3.43 Suprafețe izoterme detaliu 3.3.7.2

Tab. 3.14 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul de îmbinare între panouri de acoperiș

Detaliu îmbinare panouri de acoperiș	$\delta_{\text{termoiz.}}$	Φ_{2D}	R	R'	L_i	Ψ
	[mm]	[W]	[m ² K/W]	[m ² K/W]	[m]	[W/mK]
Panou acoperiș (stg.)	60	29.45	1.738	1.287	1.00	0.201
Panou acoperiș (dr.)	60	29.63	1.738	1.281	1.00	0.205
Panou acoperiș (stg.)	80	23.68	2.264	1.602	1.00	0.182
Panou acoperiș (dr.)	80	23.79	2.264	1.595	1.00	0.185
Panou acoperiș (stg.)	100	19.99	2.791	1.897	1.00	0.168
Panou acoperiș (dr.)	100	20.06	2.791	1.892	1.00	0.170
Panou acoperiș (stg.)	120	17.39	3.317	2.181	1.00	0.157
Panou acoperiș (dr.)	120	17.43	3.317	2.177	1.00	0.158

În această situație influența punții termice nu mai este neglijabilă, mai ales că trebuie avute în vedere și lungimile mari ale îmbinărilor între panouri raportat la dimensiunea planșeului acoperiș, respectiv repetabilitatea acestui tip de punte termică în cadrul planșeului de acoperiș. Acest caz de practică curentă nu este justificat din punct de vedere termotehnic.

3.4 Propuneri de detalii constructive optimizate din punct de vedere energetic pentru elementele anvelopei

În urma analizei mai multor detalii de îmbinări ale închiderilor cu panouri de tip sandwich și interpretarea rezultatelor, s-a ajuns la concluzia ca principalele detalii care au potențial de îmbunătățire semnificativă a comportării la transfer termic, prin reducerea efectului punților termice, sunt detaliile de îmbinare a panoului de perete cu placa pe sol.

Astfel, s-au analizat variante de elaborare a detaliului care să reducă efectul punții termice, prin: mărirea lungimii suprapunerii panoului de perete pe elementul de beton și optimizarea prinderii, respectiv prin termoizolarea soclului, inclusiv cu introducerea unei termoizolații orizontale în exteriorul perimetrului clădirii.

Dintre cele două tipuri de detalii de îmbinare a peretelui cu placa pe sol s-a optimizat cel mai nefavorabil din punct de vedere energetic, adică detaliul 3.3.5.1 (pag. 55). S-au analizat două tipuri de soluții:

1. Mărirea suprapunerii panoului de perete cu elementul din beton armat de la 10 cm la 30 cm – a se vedea Fig. 3.44, respectiv Tab. 3.15 - soluții tip 1:
 - Soluție 1.a - suprapunere 30 cm a panoului de perete cu soclul din beton armat;
 - Soluție 1.b - suprapunere 30 cm + injectare spumă PUR în interstiții de aer;
 - Soluție 1.c - suprapunere 30 cm + etanșare suplimentară cu EPDM în zona de prindere a panoului cu profilul metalic L care-l fixează de placă.

2. Menținerea detaliului propus de producătorul de panouri, dar cu termoizolarea suplimentară a soclului – a se vedea Fig. 3.45, respectiv Tab. 3.16 - soluții tip 2:
 - Soluție 2.a – termoizolare soclu cu 5 cm XPS până la CTS;
 - Soluție 2.b – termoizolare soclu cu 5 cm XPS, cu prelungire termoizolație 30 cm sub CTS;
 - Soluție 2.c – termoizolare soclu cu 5 cm XPS, cu prelungire 30 cm sub CTS și dispunere fâșie orizontală de 50 cm sub spațiul verde;
 - Soluție 2.d – termoizolare soclu cu 5 cm XPS, cu prelungire 30 cm sub CTS și dispunere fâșie orizontală de 100 cm sub trotuar;
 - Soluție 2.e – termoizolare soclu cu 5 cm XPS, cu prelungire pe înălțimea grinzii de fundare;
 - Soluție 2.f – termoizolare soclu 5 cm XPS cu prelungire 60 cm sub CTS și dispunere fâșie orizontală de 50 cm sub spațiu verde;
 - Soluție 2.g – termoizolare soclu 5 cm XPS cu prelungire 60 cm sub CTS și dispunere fâșie orizontală de 100 cm sub trotuar.

Calcululele numerice și analitice în vederea determinării coeficienților liniari de transfer termic s-au efectuat pentru panoul de perete cu grosimea de 80 mm.

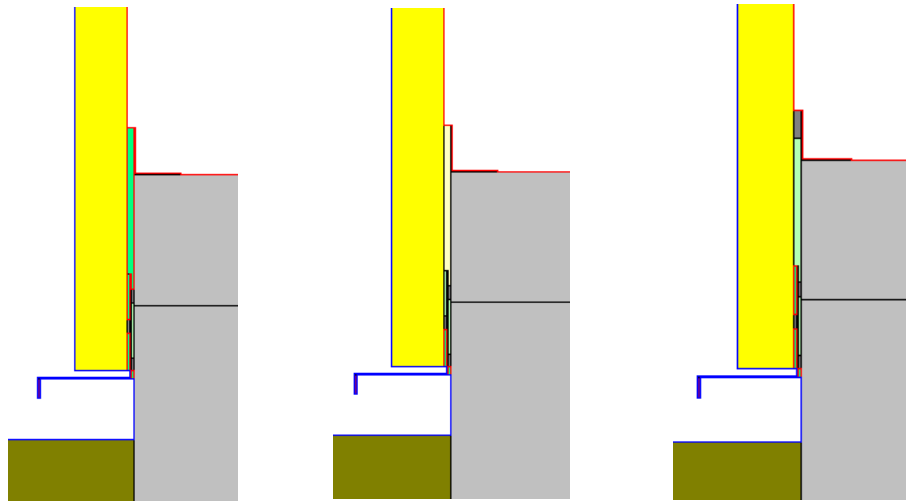


Fig. 3.44 Detalii de modelare geometrică pentru soluțiile de tip 1 - suprapunere 30 cm panou perete pe soclu
a) Soluție 1.a b) Soluție 1.b c) Soluție 1.c

Așa cum se poate observa în Tab. 3.15, în urma aplicării acestui tip de soluții se remarcă o reducere semnificativă a coeficienților liniari de transfer termic: în jur de 50% la panoul de perete, peste 40% la placa pe sol. Totuși, există situații când această soluție nu este aplicabilă deoarece diferența între cota pardoselii finite (cota ± 0.00 m) și cota terenului sistematizat (CTS) este foarte redusă.

Un alt tip de soluții de optimizare a detaliului constructiv de îmbinare a panourilor de perete cu placa pe sol, care acoperă și eventualitatea situației mai sus menționate este prezentat în Fig. 3.45, Fig. 3.46, Fig. 3.47, Fig. 3.48 și Fig. 3.49 (soluții de tip 2).

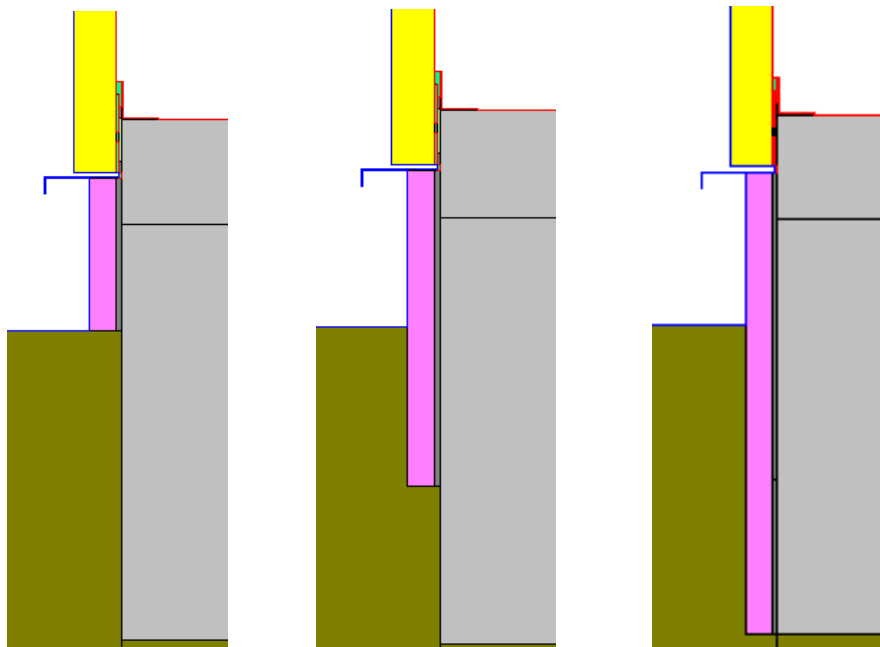


Fig. 3.45 Detalii de modelare geometrică pentru soluțiile de tip 2 – termoizolare soclu și fundație
a) Soluția 2.a b) Soluția 2.b c) Soluția 2.e

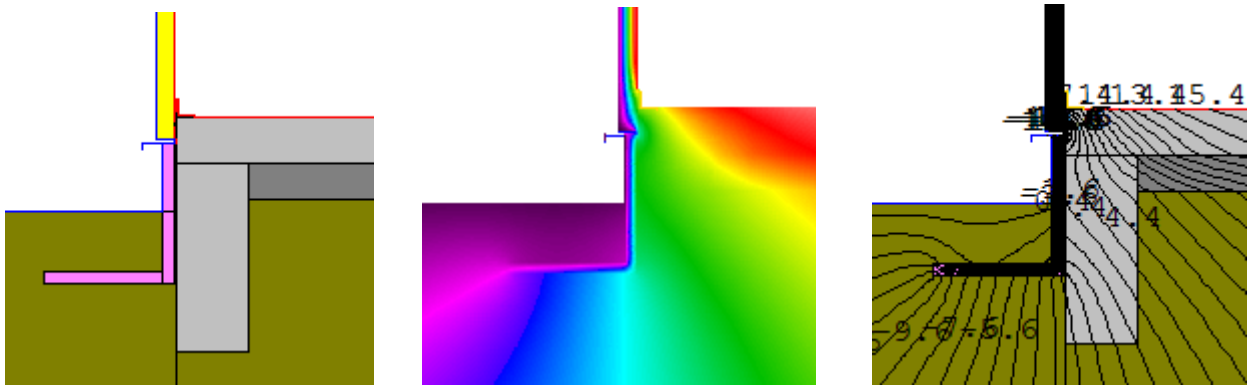


Fig. 3.46 Detalii de simulare numerică pentru soluția 2.c
a) Detaliu modelare geometrică b) Suprafețe izoterme c) Linii izoterme

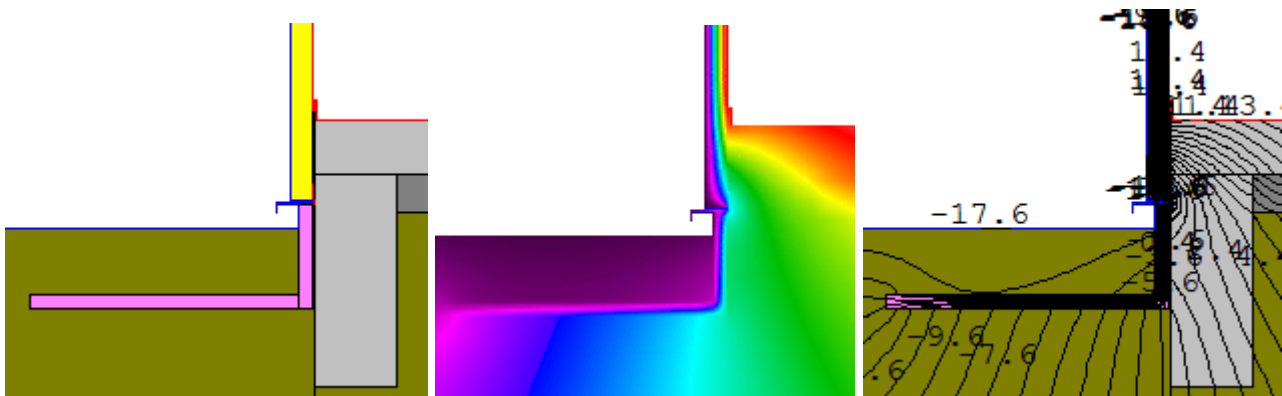


Fig. 3.47 Detalii de simulare numerică pentru soluția 2.d
a) Detaliu modelare geometrică b) Suprafețe izoterme c) Linii izoterme

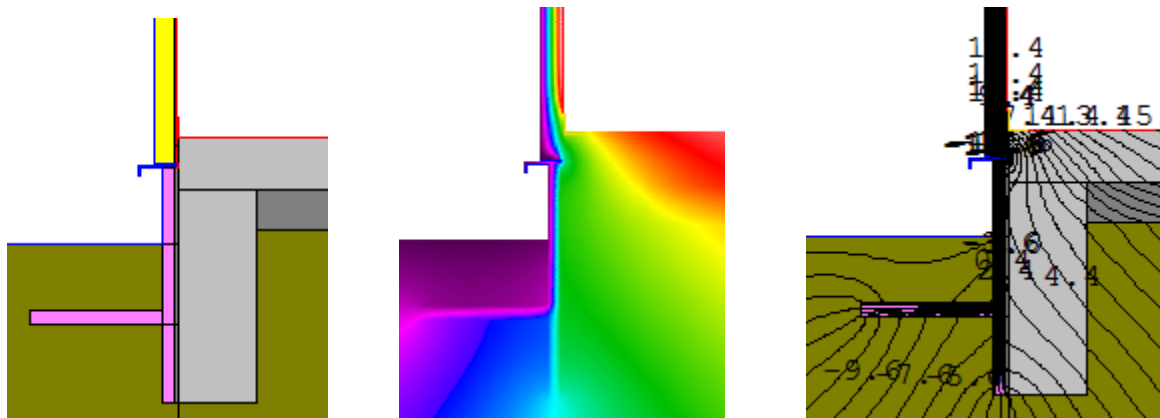


Fig. 3.48 Detalii de simulare numerică pentru soluția 2.f
a) Detaliu modelare geometrică b) Suprafețe izoterme c) Linii izoterme

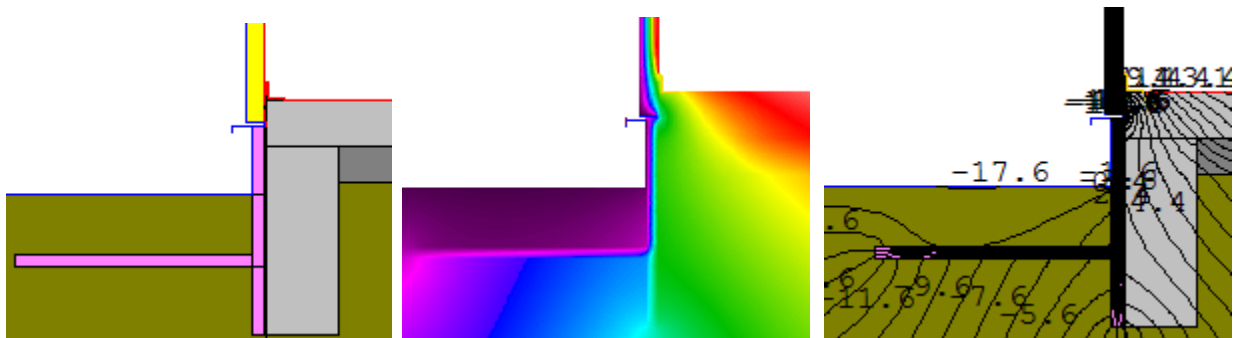


Fig. 3.49 Detalii de simulare numerică pentru soluția 2.g
a) Detaliu modelare geometrică b) Suprafețe izoterme c) Linii izoterme

Tab. 3.15 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul 3.3.5.1, optimizat prin soluții de tip 1

Nr. crt.	Detaliu analizat 3.3.5.1 - Soluții de optimizare de tip 1	Tip elem.	Φ_{2D}	ΔT	L_{2D}	$L_{2D.a}$	$\Psi_{detaliu}$	Ψ	Reducere val. Ψ cu
		[-]	[W/m]	[K]	[W/K]	[W/K]	[W/(mK)]	[W/(mK)]	[%]
	Model inițial - Suprapunere 10 cm (de referință)	Perete	31.60	38	0.832	2.011	1.142	0.364	-
		Placa sol	105.99	38	2.789			0.778	-
1.a	Suprapunere 30 cm	Perete	23.85	38	0.628	1.996	0.622	0.183	49.85
		Placa sol	92.56	38	2.436			0.440	43.49
1.b	Suprapunere 30 cm + PUR injectat	Perete	23.45	38	0.617	1.996	0.593	0.173	52.53
		Placa sol	91.81	38	2.416			0.420	46.03
1.c	Suprapunere 30 cm + etanșare EPDM	Perete	23.57	38	0.620	1.996	0.618	0.176	51.60
		Placa sol	92.62	38	2.437			0.441	43.30

Tab. 3.16 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul 3.3.5.1, optimizat prin soluții de tip 2

Nr. crt.	Detaliu analizat 3.3.5.1 – Soluții de optimizare de tip 2	Tip elem.	Φ_{2D}	ΔT	L_{2D}	Ψ_g	Ψ	Reducere val. Ψ cu
		[-]	[W/m]	[K]	[W/K]	[W/(mK)]	[W/(mK)]	[%]
	Model inițial - Suprapunere 10 cm (de referință)	Perete	31.600	38	0.832	1.142	0.364	-
		Placa sol	105.995	38	2.789		0.778	-
2.a	Termoizolație 5 cm XPS soclu până la CTS	Perete	30.640	38	0.806	0.845	0.273	25.04
		Placa sol	92.012	38	2.421		0.572	26.52
2.b	Termoizolație 5 cm XPS soclu + 30 cm sub CTS	Perete	30.145	38	0.793	0.813	0.260	28.61
		Placa sol	85.857	38	2.259		0.553	28.97
2.c	Termoizolație 5 cm XPS soclu + 30 cm sub CTS+ fâșie oriz. 50 cm sub sp. verde	Perete	30.027	38	0.790	0.809	0.257	29.46
		Placa sol	82.532	38	2.172		0.552	29.02
2.d	Termoizolație 5 cm XPS soclu + 30 cm sub CTS+ fâșie oriz. 100 cm sub trotuar	Perete	29.970	38	0.789	0.809	0.256	29.87
		Placa sol	80.542	38	2.120		0.554	28.86
2.e	Termoizolație 5 cm XPS soclu + 60 cm sub CTS	Perete	29.973	38	0.789	0.806	0.256	29.85
		Placa sol	82.588	38	2.173		0.550	29.26
2.f	Termoizolație 5 cm XPS soclu + 60 cm sub CTS + fâșie oriz. 50 cm sub sp. verde	Perete	29.928	38	0.788	0.808	0.254	30.18
		Placa sol	80.880	38	2.128		0.553	28.90
2.g	Termoizolație 5 cm XPS soclu + 60 cm sub CTS + fâșie oriz. 100 cm sub trotuar	Perete	29.886	38	0.786	0.806	0.253	30.48
		Placa sol	79.238	38	2.085		0.552	29.03

Rezultatele soluțiilor de tipul 2 sunt centralizate în Tab. 3.16. Pentru detaliile 2.a, 2.b. și 2.e s-a constatat o reducere de cca. 25-30% a coeficienților liniari de transfer termic față de valorile din detaliul inițial, atât pentru panoul de perete, cât și pentru placa pe sol.

Privind soluțiile tehnice de optimizare 2.c, 2.d, respectiv 2.f și 2.g, soluția de termoizolație perimetrală orizontală s-a propus cu intenția de a asigura o deviație a temperaturilor din zona perimetrală a intersecției perete - placă pe sol, în sensul executării unei “bariere” la trecerea fluxului termic de sub placa pe sol către exterior, urmărindu-se ca efect reducerea fluxului care se disipă către suprafața terenului care mărginește clădirea.

Varianta de termoizolație orizontală de dimensiune 50 cm s-ar preta când nu se face trotuar perimetral clădirii; varianta de termoizolație orizontală de 100 cm ar fi justificată tehnic când se amenajează trotuar perimetral, ea putând fi dispusă sub stratificația trotuarului, nefiind astfel necesare săpături suplimentare pe suprafețe mari.

Totuși, valorile coeficienților liniari de transfer termic obținuți prin simulări numerice nu sunt cu mult mai reduse decât cele aferente soluțiilor 2.b, respectiv 2.e, astfel încât se face observația că acest tip de soluție tehnică nu este neapărat justificată având în vedere cantitățile de lucrări și materiale suplimentare necesare pentru punerea lor în operă.

În final s-au analizat propunerile cele mai eficiente energetic de la fiecare tip de soluție propus, iar măsurile s-au cumulat. Descrierea combinațiilor de măsuri propuse și a rezultatelor obținute sunt prezentate în Tab. 3.17.

Tab. 3.17 Coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliul 3.3.5.1 optimizat prin soluții de tip 1+2

Soluții propuse	Tip elem.	Φ_{2D}	ΔT	L_{2D}	$\Psi_{detaliu}$	Ψ	Reducere val. Ψ cu
	[-]	[W/m]	[K]	[W/K]	[W/(mK)]	[W/(mK)]	[%]
Detaliu inițial (referință)	Perete	31.600	38	0.832	1.142	0.364	-
	Placa	105.995	38	2.789		0.778	-
1c+2b	Perete	22.302	38	0.587	0.466	0.142	61.10
	Placa	82.600	38	2.174		0.324	58.35
1b+2b	Perete	22.249	38	0.585	0.445	0.140	61.49
	Placa	81.853	38	2.154		0.304	60.88
1b+2e	Perete	22.057	38	0.580	0.423	0.135	62.87
	Placa	78.895	38	2.076		0.287	63.06

Prin combinarea soluțiilor propuse se observă o reducere semnificativă a valorilor coeficienților liniari de transfer termic, atât pentru panoul de perete (de peste 60 %), cât și pentru placa pe sol, unde reducerea este între 58 % și 63 %.

Se remarcă influența importantă a lungimii suprapunerii panoului de perete cu soclul perimetral din beton armat, astfel cu cât lungimea de suprapunere crește, cu atât efectul defavorabil al punții termice geometrice și de material scade în detaliul constructiv.

Având în vedere specificul acestui tip de detaliu constructiv, caracterizat prin fixarea panoului de perete de placa de sol cu profile metalice tip L, prinderi metalice necesare din considerente de rezistență și stabilitate, rezultatele obținute se consideră satisfăcătoare.

Soluțiile propuse reduc efectul punților termice perimetrare, pentru detaliile identificate în subcap. 3.3 ca fiind cele mai nefavorabile din perspectiva energetică și care se regăsesc uzual în practica curentă de proiectare.

În ceea ce urmează se va studia efectul valorilor obținute în subcap. 3.3 pentru coeficienții liniari de transfer termic integrat în calculul termotehnic la nivel de fațadă pentru panouri de pereți, respectiv la nivel de planșeu superior pentru panouri de acoperiș.

Astfel, cercetarea se continuă cu o analiză a impactului punților termice determinate numeric la nivel de detalii constructive, în vederea studierii efectului acestor rezultate în performanța termică a elementelor anvelopei clădirii.

3.5 Studiu parametric al impactului punților termice în elementele anvelopei clădirii

În vederea obținerii unei perspective globale cu privire la performanța termică a panourilor de tip sandwich, s-a trecut de la analiza de detaliu constructiv la analiza de element al anvelopei clădirii, sau, altfel spus, de la analiza locală a efectului punții termice de intensificare a valorilor fluxului termic, specifică detaliului constructiv, cu determinarea coeficienților liniari de transfer termic, la evaluarea impactului punților termice în performanța termică a fațadei, respectiv a planșeului de acoperiș.

Astfel, s-au determinat rezistențele termice corectate pentru câteva dimensiuni de fațadă, în ipoteza utilizării panourilor de tip sandwich pentru pereți cu grosimea de 10 cm, grosime considerată uzuală pentru acest tip de soluție constructivă, pentru lungimea exterioară a peretelui de 30 m și înălțimea de 4 m, respectiv 6 m. S-au utilizat câteva scenarii distincte cu privire la existența sau nu a suprafețelor vitrate, a procentului de suprafețe vitrate raportat la suprafața fațadei analizate, respectiv a tipului de îmbinare pentru detaliile unde s-au analizat două variante distincte pentru același tip de detaliu constructiv, în cazul îmbinării panoului de perete cu placa pe sol și a îmbinării între panourile de perete (în Tab. 3.18 cu denumirea *Detalii distincte utilizate*). Câteva date de intrare în această analiză sunt centralizate în Tab. 3.18.

Tab. 3.18 Caracteristici geometrice ale fațadelor de pereți analizate

Caz	Detalii distincte utilizate	δ_{panou}	L_e	L_i	h_i	S_i
		[cm]	[m]	[m]	[m]	[m ²]
A1	3.3.5.1 (pag. 55) 3.3.2.1(pag. 49)	10	30	29.80	4.00	119.20
A2	3.3.5.2 (pag. 56) 3.3.2.1(pag. 49)	10	30	29.80	4.00	119.20
B1	3.3.5.1 (pag. 55) 3.3.2.1(pag. 49)	10	30	29.80	6.00	178.80
B2	3.3.5.2 (pag. 56) 3.3.2.1(pag. 49)	10	30	29.80	6.00	178.80

Totodată s-a efectuat și analiza influenței fiecărei punți termice asupra fațadei analizate pentru toate cele 4 cazuri considerate, în funcție de valoarea coeficientului liniar de transfer termic obținut pe tip de detaliu și lungimea pe care acesta se aplică ($\psi \cdot l$) – vezi Fig. 3.50 și Fig. 3.51.

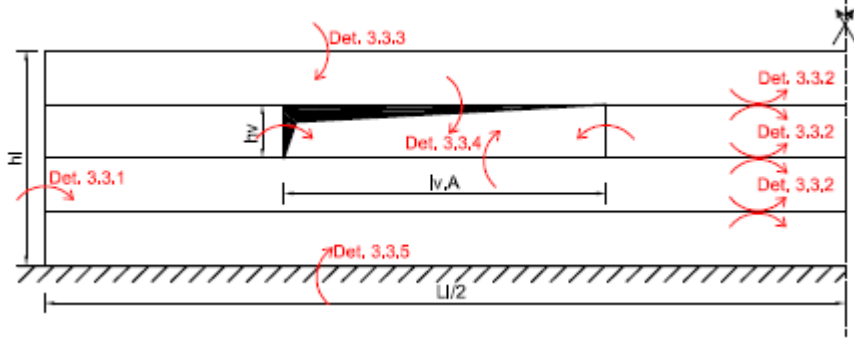


Fig. 3.50 Schiță amplasare punți termice în cadrul fațadei analizate – Cazuri A1, A2
a1) Procent suprafețe vitrate 10%

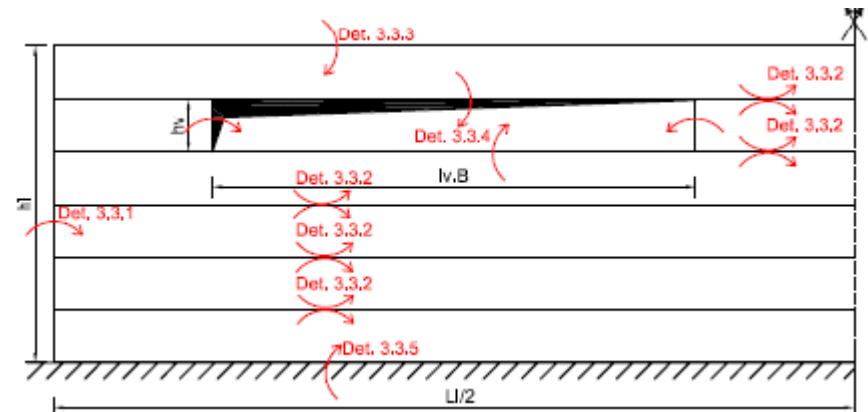
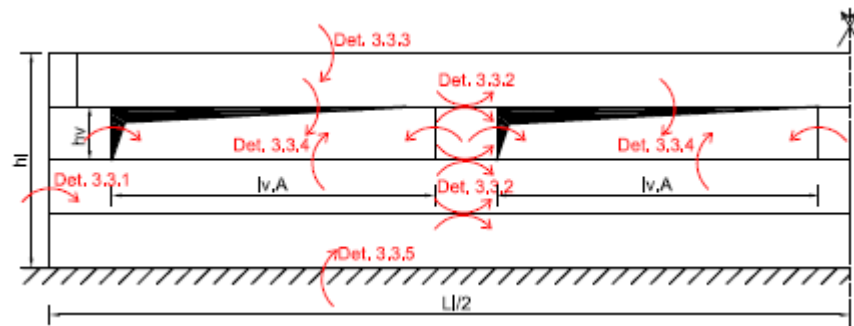
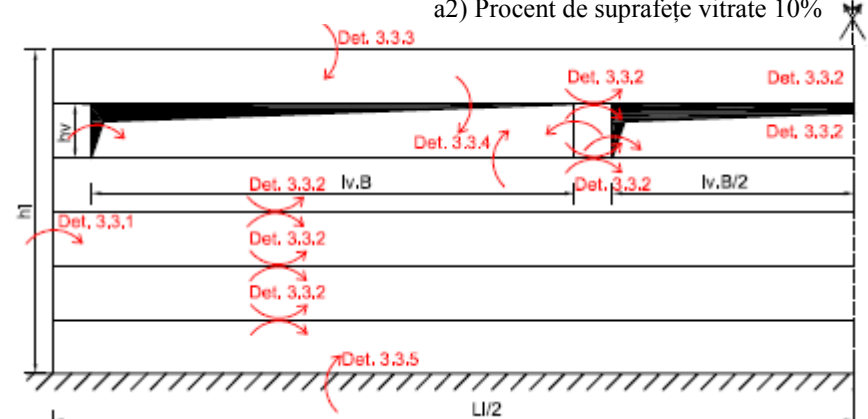


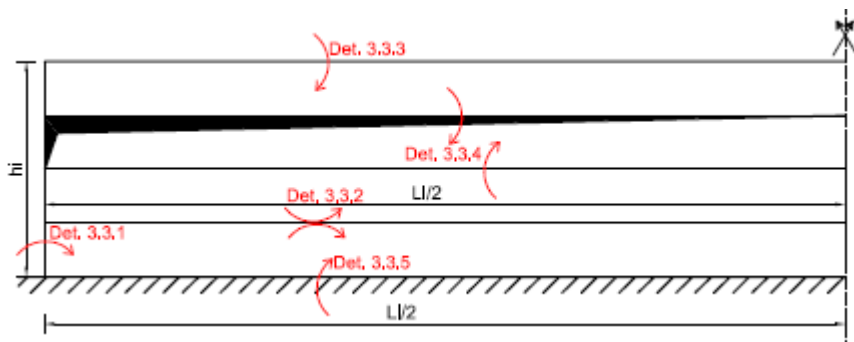
Fig. 3.51 Schiță amplasare punți termice în cadrul fațadei analizate – Cazuri B1, B2
a2) Procent suprafețe vitrate 10%



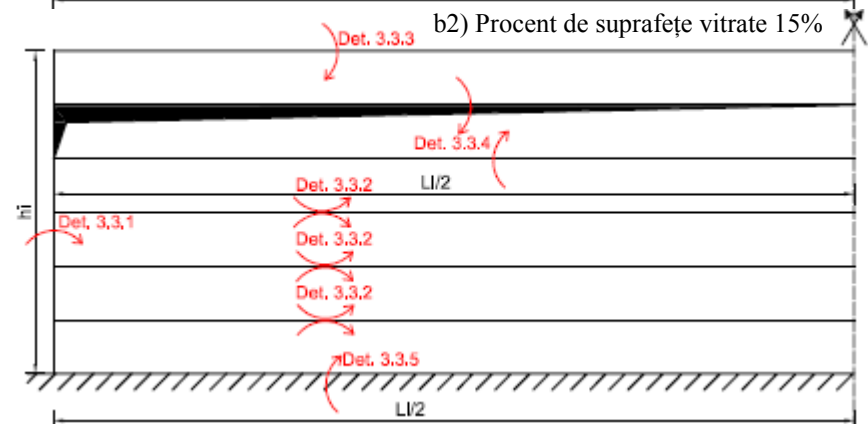
b1)) Procent suprafețe vitrate 20%



b2) Procent de suprafețe vitrate 15%



c1) Procent suprafețe vitrate 25%



c2) Procent de suprafețe vitrate 30%

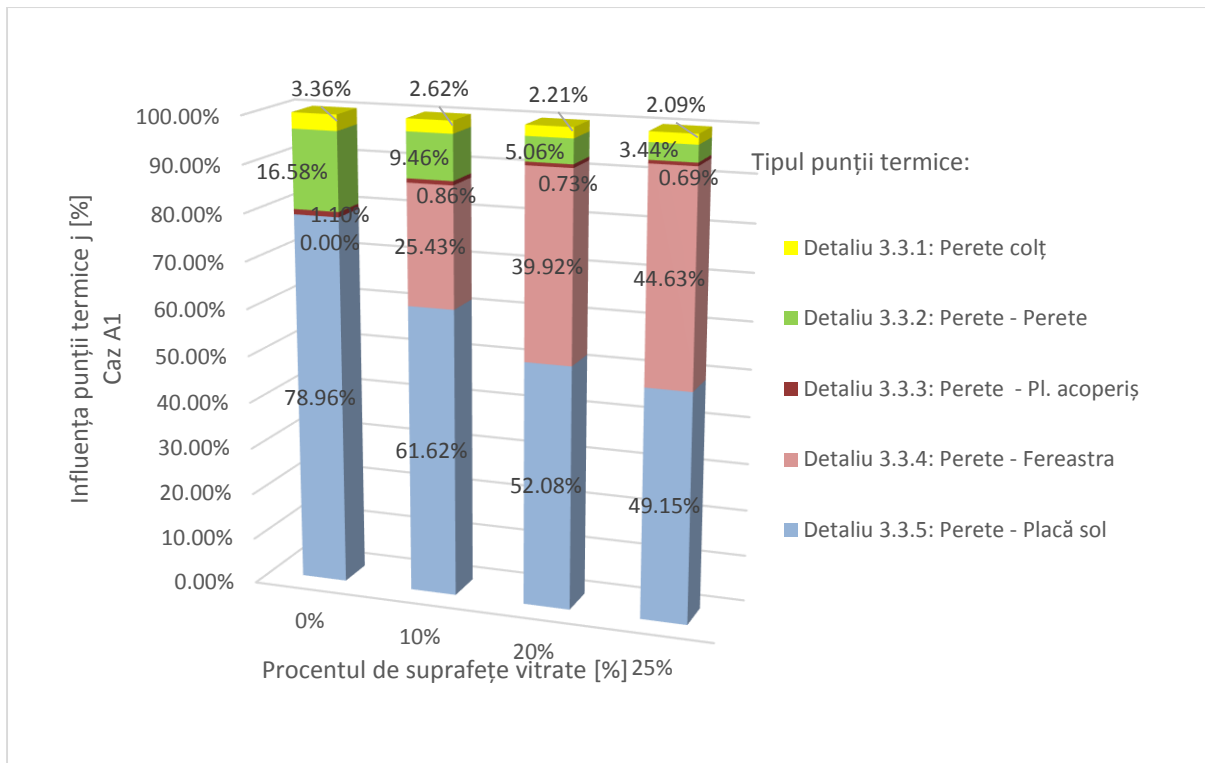


Fig. 3.52 Analiza influenței punților termice asupra fațadei analizate – Caz A1

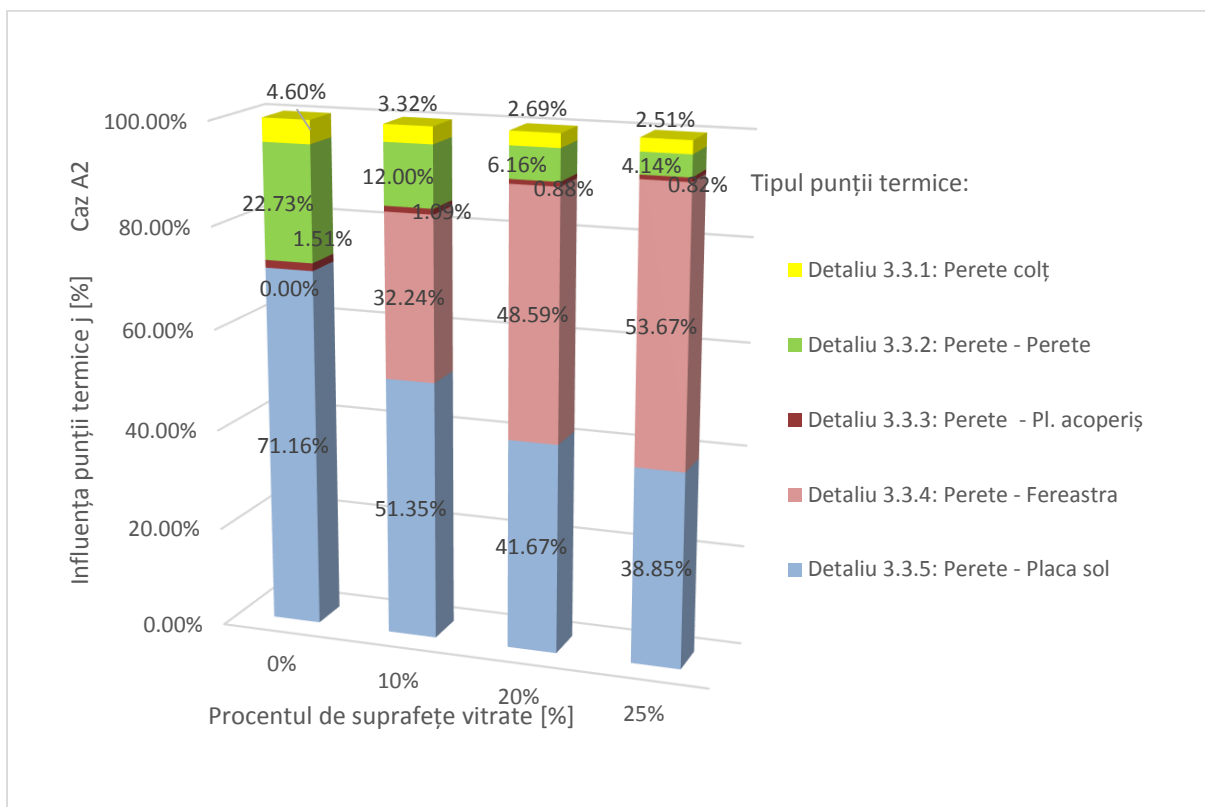


Fig. 3.53 Analiza influenței punților termice asupra fațadei analizate – Caz A2

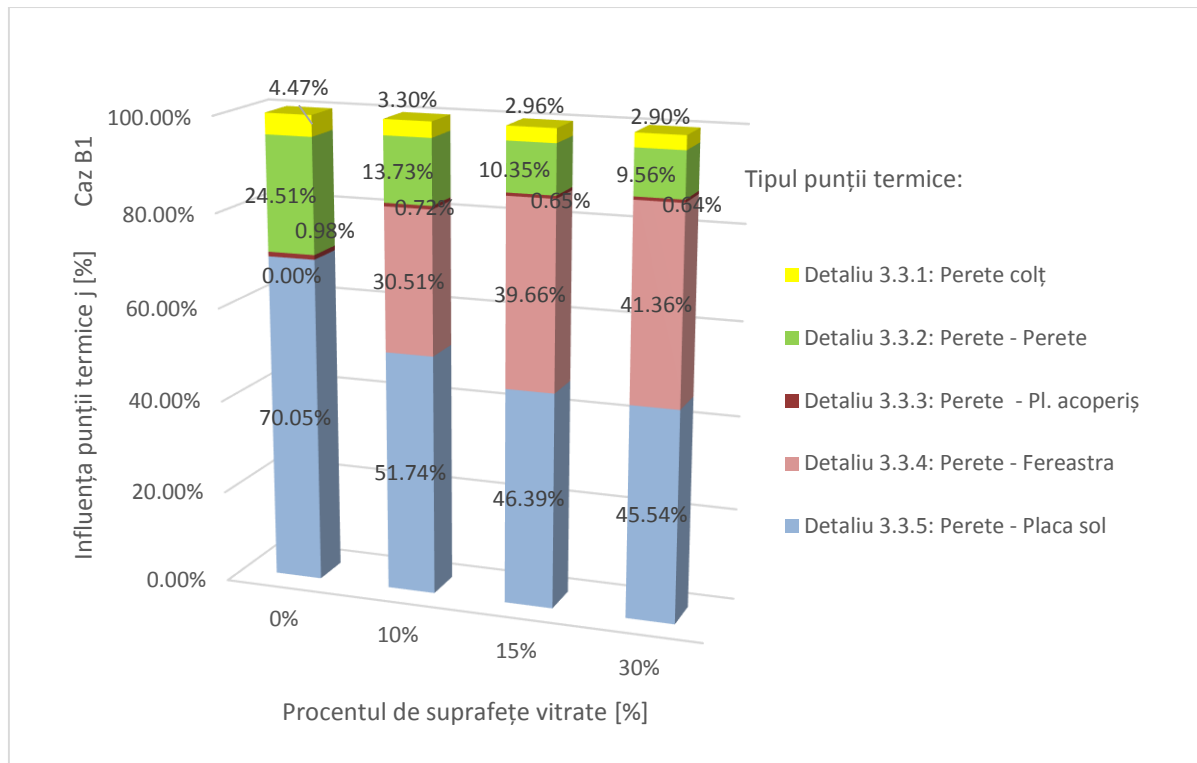


Fig. 3.54 Analiza influenței punților termice asupra fațadei analizate – Caz B1

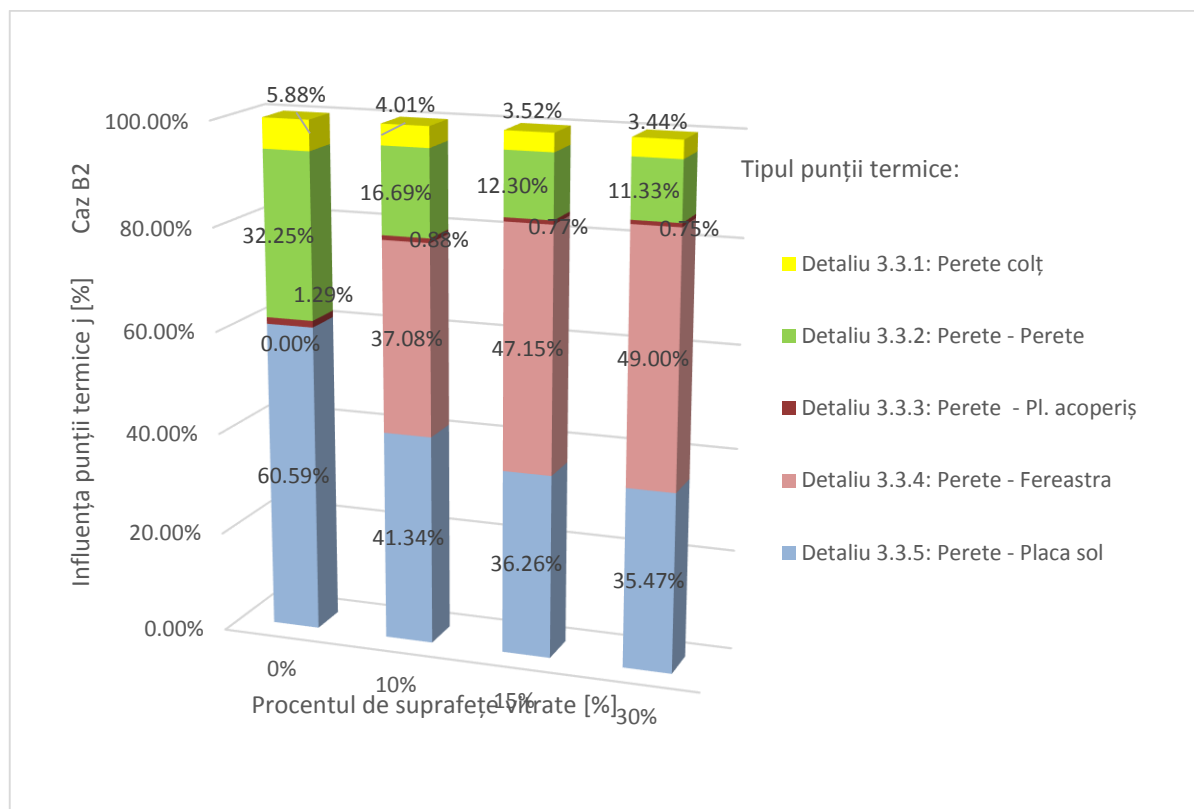


Fig. 3.55 Analiza influenței punților termice asupra fațadei analizate – Caz B2

Se face precizarea că la nivelul elementului de anvelopă pentru determinarea lungimii de îmbinare orizontală între panourile de perete s-a considerat lățimea fiecărui panou egală cu 1 m [79]. Rezultatele obținute sunt centralizate în Tab. 3.19.

Tab. 3.19 Rezistențe termice corectate obținute pentru fațadele analizate

Caz	Rezultate	Procent de suprafețe vitrate			
		0%	10%	20%	25%
A1, A2, B1, B2	R	2.799	2.799	2.799	2.799
A1	R'	2.096	1.958	1.856	1.820
	r	0.75	0.70	0.66	0.65
A2	R'	2.249	2.091	1.975	1.933
	r	0.80	0.75	0.71	0.69
Caz	Rezultate	0%	10%	15%	30%
B1	R'	2.031	1.852	1.782	1.770
	r	0.73	0.66	0.64	0.63
B2	R'	2.175	1.970	1.891	1.878
	r	0.78	0.70	0.68	0.67

Analizând rezultatele prezentate în Tab. 3.19, se observă că influența punților termice care există la îmbinările între panouri (îmbinările panourilor de pereți cu panouri de pereți, cu panouri de acoperiș, la colțurile fațadei clădirii) sunt relativ reduse, însă există două tipuri de detalii constructive uzuale (îmbinarea panourilor de perete cu fereastra și îmbinarea cu placa pe sol) a căror punți termice geometrice și de material existente au un impact major asupra performanței termice a elementului de anvelopă al clădirii, reducând semnificativ performanța energetică a fațadei pentru acest tip de soluție constructivă, așa cum se poate observa în Fig. 3.52, Fig. 3.53, Fig. 3.54 și Fig. 3.55.

S-au determinat rezistențele termice corectate și pentru planșeul de tip terasă necirculabilă (planșeu acoperiș), tot pentru grosimea panoului de 10 cm și dimensiunea exterioară a acoperișului (proiecția orizontală) de 30x30 m.

Tab. 3.20 Date de intrare și rezultate obținute pentru planșeul de tip terasă necirculabilă analizat

Caz	Detaliu distinct utilizat	L_e	L_i	L_i	S_i	R	R'	r
		pr.oriz.	pr.oriz.	pantă 7°				
		[m]	[m]	[m]	[m ²]	(m ² K)/W	(m ² K)/W	[-]
C1	3.3.7.1 (pag. 59)	30	29.8	30.22	900.56	2.791	2.743	0.98
C2	3.3.7.2 (pag.61)	30	29.8	30.22	900.56	2.791	1.460	0.52

Conform rezultatelor obținute în Tab. 3.20, în cazul C1 se remarcă o influență neglijabilă a punților termice asupra elementului de anvelopă studiat, însă rezistența termică corectată se înjumătățește în cazul C2, ceea ce reprezintă o performanță termică foarte redusă pentru elementul de anvelopă.

De asemenea, s-a efectuat și analiza influenței fiecărei punți termice asupra planșeelor analizate pentru cele două cazuri considerate, conform Fig. 3.56 și Fig. 3.57. Se face precizarea că la nivelul elementului de anvelopă pentru determinarea lungimii de îmbinare între panourile de acoperiș s-a considerat lățimea fiecărui panou egală cu 1 m [79], iar îmbinarea panourilor se execută paralel cu deschiderea halei (paralel cu lățimea planșeului studiat).



Fig. 3.56 Analiza influenței punților termice asupra planșeului acoperiș analizat – Caz C1

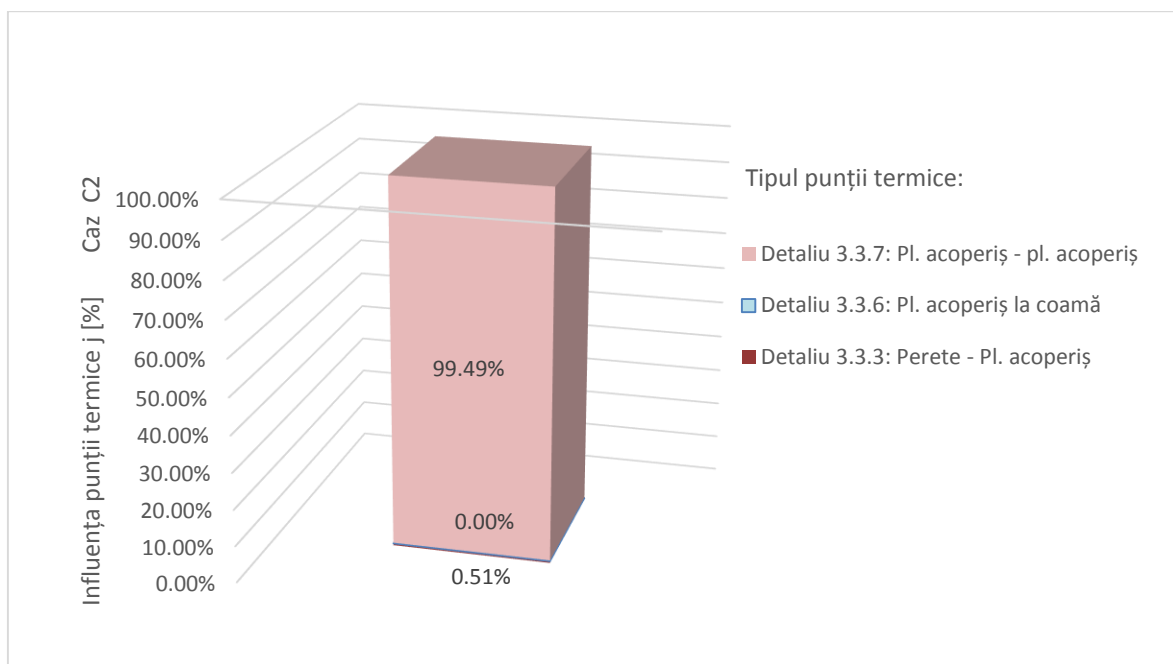


Fig. 3.57 Analiza influenței punților termice asupra planșeului acoperiș analizat – Caz C2

Referitor la cazul C2, în ceea ce privește ponderea fiecărui tip de punte termică, în Fig. 3.57 se identifică care este puntea termică care are efectul cel mai neavorabil și se observă că acesta este dat de îmbinarea între panourile de acoperiș.

3.6 Contribuții și concluzii

Prin studiile efectuate în acest capitol s-a dorit obținerea unor informații cu privire la performanța termică a detaliilor constructive utilizate în mod curent pe piață la închiderile în

speță a halelor, dar și a altor clădiri nerezidențiale, cu panouri compozite termoizolate cu înveliș metalic, de tip sandwich. Rezultatele obținute la nivel de detaliu constructiv s-au integrat în analize la nivel de element al anvelopei clădirii.

Subcap. 3.1 și subcap. 3.2 prezintă câteva considerente teoretice cu privire la metodele numerice și analitice aplicate, respectiv detaliază condițiile de analiză numerică în baza cărora s-au efectuat aceste studii. Rezultatele studiilor întreprinse sunt detaliate în subcap. 3.3, subcap. 3.4 și subcap. 3.5 și reprezintă *contribuții aplicative*.

Diversitatea mare a detaliilor constructive existente la ora actuală fac imposibilă o analiză completă a acestui tip de soluție tehnică, dar rezultatele simulărilor numerice a unor detalii constructive utilizate în mod curent oferă o imagine comprehensivă și extensivă a influenței punților termice liniare geometrice și/sau de material asupra lor.

La ora actuală nefiind disponibile nici un fel de studii de acest tip cu privire la această tematică, actualele studii întreprinse vin să completeze cunoștințele actuale, reprezentând totodată un instrument curent de lucru pentru auditorii energetici care pot utiliza valorile coeficienților liniari de transfer termic în analizele necesare elaborării certificatelor de performanță energetică, iar pe baza soluțiilor constructive optimizate propuse în subcap. 3.4, chiar și în audituri energetice elaborate pentru clădirile care utilizează acest tip de soluții constructive. Totodată, rezultatele obținute pot fi utilizate de către specialiștii în inginerie civilă și arhitecți la elaborarea unor studii termotehnice privind performanța termică a clădirilor proiectate.

Cunoașterea unor probleme specifice acestor tipuri de clădiri, poate conduce la corectarea unor erori de proiectare și execuție actuale, cu intenția finală de diminuare a consumului de energie în exploatare. În acest sens, în subcap. 3.3 s-a identificat că cele mai mari valori ale coeficienților liniari de transfer termic s-au obținut la detaliul de îmbinare panou de perete cu placa pe sol, astfel că în subcap. 3.4 s-au propus mai multe variante de optimizare a detaliilor, în vederea diminuării semnificative a efectului punților termice existente.

În analiza efectuată pentru determinarea coeficienților liniari de transfer termic a detaliilor de îmbinare a panoului de perete cu placa pe sol, respectiv în analiza soluțiilor de optimizare propuse s-au remarcat o serie de efecte, astfel că se fac următoarele precizări cu caracter general:

- ❖ La intersecția elementului constructiv termoizolat (panou de perete) cu elementul netermoizolat (soclu netermoizolat) se remarcă creșterea efectului de punte termică în elementul termoizolat odată cu creșterea grosimii termoizolației în panou;
- ❖ Se remarcă influența importantă a lungimii suprapunerii panoului de perete cu elementul perimetral din beton armat; astfel, cu cât lungimea de suprapunere crește, efectul defavorabil al punții termice geometrice și de material scade în ambele elemente de construcție.

În subcap. 3.5 s-au efectuat studii parametrice, cu intenția de a integra rezultatele obținute la nivel de detaliu, în studii la nivel de element de anvelopă clădire, pentru pereții exteriori și planșeul de tip terasă necirculabilă. Rezultatele studiilor evidențiază că impactul punților termice asupra performanței termice a elementelor de anvelopă, în special pentru

pereți, este semnificativ, similar pereților din zidărie de cărămidă cu termoizolație dispusă clasic la exterior.

Conținutul întregului capitol poate fi considerat un catalog de punți termice specifice acestui tip de soluție constructivă de închidere, caracteristic clădirilor din sectorul nerezidențial.

Capitol 4 Studiul comprehensiv al transferului de căldură la plăci pe sol de dimensiuni mari prin utilizarea metodelor numerice

Motivația elaborării acestui capitol în cadrul tezei este fundamentată mai jos:

Placa pe sol este un element important al anvelopei clădirilor nerezidențiale de tip hală, prin prisma suprafeței ocupate raportat la suprafața totală a anvelopei clădirii.

Pentru detaliile constructive în contact cu solul prezentate în capitolul 3 s-au determinat valori ale coeficienților liniari de transfer termic prin ambele metode existente în reglementările tehnice aflate în vigoare la nivel național: C 107/5-2005 [3] și SR EN 10211:2017 [1]. S-au observat diferențe semnificative între rezultatele obținute, iar pentru exemplificare în acest sens în Tab. 4.1 se prezintă rezultate pentru detaliul 3.3.5.2, o analiză comparativă efectuându-se pentru intersecția plăcii pe sol cu panoul de perete cu grosimea de 100 mm. Referitor la grosimea peretelui se face mențiunea că grosimea învelișului metalic fiind extrem de redusă 0.6 mm spre exterior, respectiv 0.4 mm spre interior, este neglijabilă, considerându-se în exprimare că grosimea panoului este egală cu grosimea termoizolației din panou.

Se face precizarea că s-au respectat aceleași condiții pentru analiza numerică în regim staționar, cazul bidimensional, efectuată conform C107/5-2005, ca și cele precizate în subcap. 3.2, cu următoarele particularități: geometria modelului este cea indicată în Anexa C, C107/5-2005, respectiv limita inferioară sol este condiție de tip Dirichlet, $T_{\text{sol}} = 9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ la 7 m sub CTS.

Tab. 4.1 Analiză comparativă valori coeficienți liniari de transfer termic pentru detaliu 3.3.5.2

Detaliu 3.3.5.2	$\delta_{\text{termoiz. perete}}$	Ψ – SR EN 13370	Ψ – C07/5-2005	Eroare
	[mm]	[W/mK]	[W/mK]	[%]
Placa pe sol	100	0.898	2.068	56.58

Referitor la rezultatele obținute mai sus se ridică următoarea întrebare: care valoare ψ reflectă cel mai bine procesul de transfer de căldură între clădire și sol în timp și de ce?

Totodată, se ridică o altă întrebare cu privire la acest subiect: care este efectul proprietăților de inerție termică ale solului asupra procesului de transfer de căldură în cazul plăcilor pe sol de dimensiuni mari pentru perioade îndelungate de timp?

La aceste întrebări se dorește obținerea de răspunsuri prin elaborarea acestui capitol.

Astfel, în baza celor enunțate mai sus se evidențiază necesitatea unor studii comprehensive ale transferului de căldură la plăcile pe sol de dimensiuni mari. Calculul performanței energetice a clădirilor nerezidențiale se continuă prin analiza numerică în regim staționar și nestaționar la nivelul părților de clădire în interacțiunea cu solul, pe modele tridimensionale.

4.1 Metode de calcul al transferului de flux termic aplicabile specificului problematicei studiate: plăci pe sol de dimensiuni mari

4.1.1 Metode analitice de calcul a pierderilor termice prin sol

Dintre metodele analitice dezvoltate în România, pentru rezolvarea ecuației căldurii în regim staționar fără surse interioare de căldură, de reținut este cea dezvoltată de N. Leonăchescu [80], [81]. Aceasta este validată pe baza analogiei termo-electro-hidrodinamice, care definește spectrul liniilor de flux termic constituit din semicercuri având centrele în axul peretelui, ortogonale izotermelor. Metoda permite identificarea unor puncte de separație a liniilor de flux termic în anumite condiții.

Soluția utilizată este formulată prin funcții analitice pentru două ipoteze, cu existența sau nu a apei subterane în sol. În ipoteza că nu există strat de apă subterană fluxul termic pentru solicitare termică simetrică se determină cu relația (4-1).

$$\phi_e = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi} \cdot (T_i - T_e) \cdot \ln \left\{ \left[\frac{R + \frac{\pi}{2 \cdot \lambda} \cdot (L_{1i} + \delta)}{R + \frac{\pi \cdot \delta}{2 \cdot \lambda}} \right]^{L_{2i}} + \left[\frac{R + \frac{\pi}{2 \cdot \lambda} \cdot (L_{2i} + \delta)}{R + \frac{\pi \cdot \delta}{2 \cdot \lambda}} \right]^{L_{1i}} \right\} \quad (4-1)$$

Pentru studiile prezentate în acest capitol, prezintă interes soluțiile analitice formulate în ipoteza în care există un strat de apă subterană, fluxul termic fiind separat în două componente, una spre aerul exterior și una spre sol (vezi Fig. 4.1). Prin impunerea condiției egalității densităților de flux, cea dirijată către aerul exterior va fi egală cu cea dirijată către pânza de apă freatică.

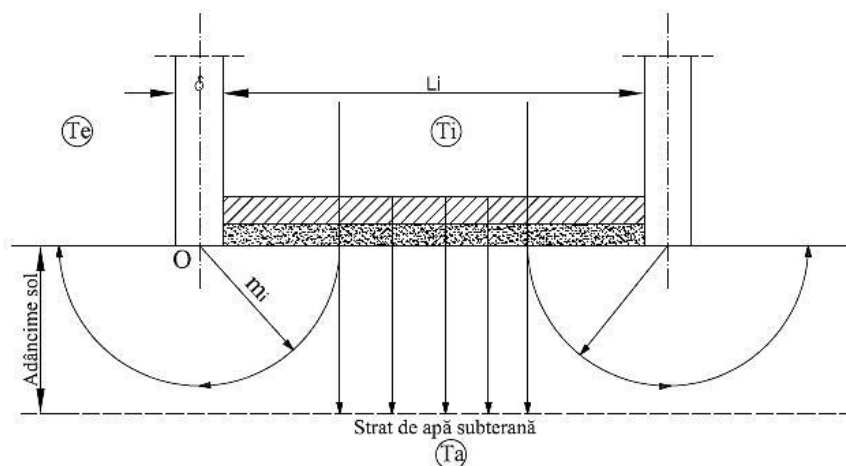


Fig. 4.1 Distribuția fluxului termic în cazul existenței apei subterane [80], [81]

În această metodă pentru solicitare termică simetrică fluxul termic se determină cu relațiile (4-2) și (4-3).

$$\phi_e = \frac{P_i \cdot \lambda}{\pi} \cdot (T_i - T_e) \cdot \ln \left[\frac{R + \frac{\pi \cdot m_i}{\lambda}}{R + \frac{\pi \cdot \delta}{2 \cdot \lambda}} \right] \quad (4-2)$$

$$\Phi_w = \frac{(T_i - T_w)}{R_w} \cdot (L_{1i} + \delta - 2m_1) \cdot (L_{2i} + \delta - 2m_2) \quad (4-3)$$

unde, m_i reprezintă coordonatele punctului de separare al liniilor de flux termic în planul xOy aferent dimensiunii i .

Se precizează că în modelul propus în acest capitol există o oarecare similitudine cu rezolvarea analitică din [80], prin prisma condițiilor de contur utilizate. Astfel, în modelul analitic este introdusă condiția de temperatură constantă la o anumită adâncime în sol (ca și limită a pânzei de apă freatică); în modelul numeric această condiție este impusă ca limită de temperatură constantă a solului, cu precizarea că în modelul numeric, limita de adâncime a temperaturii constante s-a luat în considerare în baza rezolvării analitice a ecuației căldurii dezvoltată de Hillel [82] și prin consultarea altor surse [81], [83], [84], identificându-se astfel adâncimea de la care temperatura în sol este constantă.

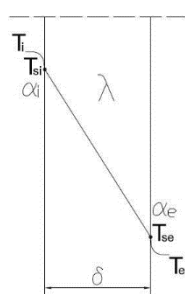
4.1.2 Considerente teoretice în modelarea numerică a transferului de căldură în câmp bidimensional și tridimensional, în regim termic staționar și nestaționar. Exemplu de calcul

Transmisia căldurii prin conducție este preponderentă în transferul de căldură între construcții și mediul înconjurător.

Pentru determinarea densității de flux termic (flux termic transmis pe unitate de suprafață) ecuația care se rezolvă este ecuația (4-4), fundamentată în 1822 de J.B.J Fourier [85], utilizând gradientul temperaturii și conductivitatea termică:

$$q = -\lambda \cdot \nabla T \quad (4-4)$$

O soluție particulară a aceste ecuații, frecvent întâlnită în literatura de specialitate [86], [81] apare în cazul transferului de flux termic unidirecțional printr-un perete plan, a cărei rezolvare conduce la relația analitică (4-5).



$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} \cdot (T_i - T_e) = \frac{1}{R} \cdot (T_i - T_e) \quad (4-5)$$

Fig. 4.2 Procesul de transfer de căldură într-un perete plan omogen

Pornind de la legea conservării energiei (principiul I al termodinamicii), prin aplicarea legii lui Fourier în ecuația bilanțului termic a conducției printr-un element de volum infintezimal [87], [88] (4-6), se determină ecuația diferențială de tip parabolic caracteristică regimului termic nestaționar, fără surse de căldură, care descrie transferul de căldură prin conducție într-un corp omogen și izotrop, sub forma particularizată a ecuației generale a conducției termice, denumită ecuația lui Fourier (4-7).

$$\left[\begin{array}{l} \text{căldura care rămâne în element} \\ \text{după parcurgerea de pe o față pe fața opusă,} \\ \text{în timpul dt} \\ \text{(datorată lucrului mecanic al forțelor} \\ \text{exterioare care acționează asupra sistemului)} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{căldura acumulată în element,} \\ \text{în timpul dt} \\ \text{(datorată variației energiei} \\ \text{interne a sistemului)} \end{array} \right] \quad (4-6)$$

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla^2 T \quad (4-7)$$

Considerând regimul termic staționar se ajunge la ecuația (4-8), care descrie fenomenul de propagare a căldurii în sol, fără surse de căldură, o altă formă particularizată a ecuației generale a conducției termice, denumită ecuația lui Laplace. Legea de variație a câmpului de temperaturi este exprimată printr-o ecuație diferențială de tip eliptic.

$$\nabla^2 T = 0 \quad (4-8)$$

Analizând semnificația mărimilor fizice care apar în relația (4-7) comparativ cu relația (4-8), se poate concluziona că studiul comprehensiv al unor modele în regim nestaționar devine necesar prin prisma ignorării efectului de masă termică al pământului în simulările în regim staționar, în vederea determinării consecințelor fizice ale ignorării acestui efect.

Pentru rezolvarea modelelor matematice care descriu comportarea statică sau dinamică a sistemelor fizice (cum sunt ecuațiile (4-4), (4-7), (4-8)), este convenabilă rezolvarea numerică, în detrimentul rezolvării lor prin modele analitice greoaie [89].

Scurtă introducere în metoda elementului finit

Metodele numerice bazate pe elemente finite s-au dezvoltat la sfârșitul anilor 1950 și au fost inițial dezvoltate pentru ingineria aeronautică. Principalele metode sunt: metoda elementului finit (MEF), metoda diferențelor finite (MDF) și metoda volumelor finite (MVF) [90], [91].

Metoda elementului finit are un caracter foarte general, permițând rezolvarea mai multor legi care guvernează fenomene fizice în sisteme spațial - temporale, diferențierea fiind făcută, de fapt, de tipul ecuațiilor diferențiale parțiale (eliptice, parabolice, hiperbolice) a căror necunoscute trebuie determinate [90], [92]. Metoda are o aplicabilitate largă în ingineria civilă în domeniul mecanicii corpului solid, însă se pretează foarte bine și în studiul câmpului de temperaturi și proceselor de transfer termic care au loc între clădire și mediul înconjurător.

Odată cu dezvoltarea metodelor numerice s-a constatat că MEF este adaptată în mod intrinsec pentru rezolvarea sistemelor de ordinul 2, prin introducerea unor funcții de aproximare care permit transformarea ecuațiilor diferențiale parțiale în sisteme de ecuații algebrice, care admit determinarea necunoscutelor. Pentru ecuația (4-8) necunoscuta este valoarea temperaturii în orice punct din domeniul analizat.

În Tab. 4.2 este prezentat un studiu comparativ de formulare MEF în mecanica solidului deformabil versus transferul de căldură.

Tab. 4.2 Studiu comparativ de formulare MEF mecanica solidului deformabil vs. transferul de căldură

Formularea MEF	
Mecanica solidului deformabil	Transfer de căldură
<p>Legile care guvernează starea de solicitare:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Starea de deformare; ○ Starea de tensiune; ○ Relația constitutivă forțe-deplasări: $\sigma = E \cdot \varepsilon$	<p>Legea care guvernează starea de temperatură (variația câmpului de temperaturi în regim staționar fără surse de căldură):</p> $-\lambda \cdot \nabla^2 T = 0$
<i>Pas 1 Formulare variațională</i>	
<p>Prin principiul lucrului mecanic virtual [91]:</p> $\int_V \delta \varepsilon^t \cdot \sigma \, dV = \int_V \delta U^t \cdot b \, dV + \int_S \delta U^t \cdot f \, dS$	<p>Se determină forma slabă (“weak”) a ecuațiilor, prin înmulțirea cu o funcție pondere („weight function”), iar apoi se face integrare prin părți pe domeniul de analiză:</p> $\int \nabla(-\lambda \cdot \nabla T) \cdot w = 0$ $\iint (-\lambda \cdot \nabla T) \cdot w \, dV + \int \lambda \cdot \nabla T \cdot \nabla w = 0$
<i>Pas 2 Studiu la nivel de Element Finit</i>	
○ Discretizare în elemente finite (EF);	
○ Alegerea parametrilor în funcție de care se exprimă starea de solicitare:	
De ex. deplasări nodale;	Temperaturi nodale;
○ Stabilirea funcțiilor care aproximează soluția la nivel de element finit (de ex, pentru aproximări liniare - funcții polinomiale):	
$U_i = a + b \cdot x_i$;	$T_i = a + b \cdot x_i$;
○ Determinarea funcțiilor de interpolare care descriu soluția aproximată (F)	
$[U] = [F] \times \{d\}$	$[T] = [F] \times \{T_i\}$
Matricea deplasărilor = matricea de interpolare a deplasărilor x vectorul deplasărilor nodale	Matricea temperaturilor = matricea de interpolare a temperaturilor x vector temperaturilor nodale

<i>Pas 3 Asamblarea ecuațiilor elementare în vederea formulării globale a problemei</i>	
<p><i>Varianta 1</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Stabilirea matricii de rigiditate elementare și a vectorilor încărcărilor nodale $[k^{(e)}] \cdot \{d^{(e)}\} = \{p^{(e)}\}$ <p>Matrice de rigiditate elementară x vector deplasări = vector forțe nodale echivalente</p> <p><i>Varianta 2 (specifică formulării variaționale)</i></p> <p>Relația de la pasul 1 devine [91]:</p> $\sum_{e=1}^{NE} \{\delta d^{t(e)}\} \cdot [k^{(e)}] \cdot \{d^{(e)}\} = \sum_{e=1}^{NE} \{\delta d^{t(e)}\} \cdot \{p^{(e)}\}$ <p>Sunt necesare matrici boolene de aranjare $[T^{(e)}]$, care permit trecerea de la EF la sistemul de ecuații matriceale global.</p> $\sum_{e=1}^{NE} \{\delta D^t\} \cdot [T^{t(e)}] \cdot [k^{(e)}] \cdot [T^{(e)}] \cdot \{D\} = \sum_{e=1}^{NE} \{\delta D^t\} \cdot [T^{t(e)}] \cdot \{p^{(e)}\}$	<p><i>Varianta 1</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Stabilirea matricii de rigiditate elementare și a vectorilor sursă de căldură și condiții de contur la nivel de element finit $[k^{(e)}] \cdot \{T^{(e)}\} = \{B^{(e)}\}$ <p>Prin însumarea contribuțiilor elementare la fiecare nod global se assemblează matricile globale.</p> <p><i>Varianta 2 (specifică formulării variaționale)</i></p> <p>În formularea Galerkin se impune ca funcțiile pondere să fie egale funcțiile de interpolare care aproximează necunoscutele (câmpul de temperatură). Se înlocuiesc în forma “slabă” a ecuației și se derivează în raport cu T (pentru a minimiza eroarea soluției approximate) – se determină minimumul funcției. Fiecare termen al derivatei este coeficient al matricii de “rigiditate” globale.</p>
<i>Pas 4 Formularea globală a problemei</i>	
$[R] \cdot \{D\} = \{P\}$ <p>Matrice de rigiditate a structurii x vector deplasări nodale = vectorul forțelor nodale echivalente al structurii</p>	$[K] \cdot \{T\} = \{B\}$ <p>Matrice de “rigiditate” x vector temperaturi = vector condiții de contur</p>
<i>Pas 5 Rezolvarea numerică a sistemului matriceal → sistem de ecuații algebrice egal cu numărul necunoscutelor → determinarea necunoscutelor</i>	
<ul style="list-style-type: none"> ○ Deplasări în noduri. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Temperaturi în noduri.

În vederea exemplificării se propune rezolvarea numerică prin metoda elementelor finite a ecuației a căldurii în regim staționar fără surse de căldură, pe un model unidirecțional.

Se consideră un cub din pământ, de adâncime $H = 1$ m, cu suprafața secțiunii $A = 1$ m² și conductivitate termică $\lambda = 2$ W/(mK). La capetele cubului se impun condiții de contur de tip Neumann, pentru capătul superior ($x = 0$), respectiv Dirichlet pentru capătul inferior ($x = 1$).

Ecuția care se rezolvă, pentru cazul unidirecțional, axa x , este (4-9):

$$\lambda \cdot \nabla^2 T = 0 \quad (4-9)$$

Se propun condițiile care determină univoc procesul de transfer căldură în acest exemplu:

$$\begin{aligned} q|_{x=0} &= 6 \text{ W/(m}^2\text{K)} \\ T|_{x=1} &= 0 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Urmărind pașii din Tab. 4.2 avem:

Pasul 1 Formularea variațională

- Se determină forma slabă (weak) a ecuațiilor, prin înmulțirea cu o funcție pondere (“weight function”):

$$\int_0^1 w \cdot \frac{d}{dx} (\lambda \cdot \frac{dT}{dx}) dx = 0 \quad (4-10)$$

- Eq. (4-10) se integrează prin părți:

$$\int_0^1 \frac{dw}{dx} (\lambda \cdot \frac{dT}{dx}) dx = w \cdot \lambda \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_0^1 - \int_0^1 w \cdot \frac{d}{dx} (\lambda \cdot \frac{dT}{dx}) dx \quad (4-11)$$

- Ultimul termen al eq. (4-11) este egal cu zero și rezultă:

$$\int_0^1 \frac{dw}{dx} (\lambda \cdot \frac{dT}{dx}) dx = w \cdot \lambda \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_0^1 \quad (4-12)$$

- În eq. (4-12) se introduce legea lui Fourier, eq. (4-4) și rezultă relația (4-13):

$$\int_0^1 \frac{dw}{dx} (\lambda \cdot \frac{dT}{dx}) dx = -q \cdot w \Big|_0^1 \quad (4-13)$$

Pasul 2 Studiu la nivel de Element Finit

- Se propune discretizarea în 4 elemente finite, cu 5 noduri (vezi Fig. 4.3), cu aproximarea necunoscutelor (temperaturile) prin polinoame liniare de tipul (4-14).

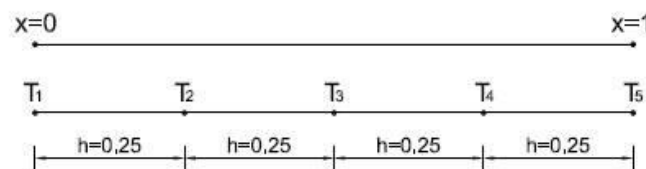


Fig. 4.3 Discretizarea modelului numeric în elemente finite

$$T^{(e)} = a + b \cdot x \quad (4-14)$$

- Astfel, pentru nodul i și nodul j, considerate noduri succesive, avem funcțiile de aproximare ale necunoscutelor:

$$T_i^{(e)} = a + b \cdot x_i \quad (4-15)$$

$$T_j^{(e)} = a + b \cdot x_j \quad (4-16)$$

- Prin scăderea relațiilor (4-16) și (4-15) se obține valoarea coeficientului b, iar în mod analog se obține valoarea coeficientului a:

$$b = \frac{1}{h} \cdot (T_j^{(e)} - T_i^{(e)}) \quad (4-17)$$

$$a = \frac{1}{h} \cdot (T_i^{(e)} \cdot x_j - T_j^{(e)} \cdot x_i) \quad (4-18)$$

- Înlocuind (4-17) și (4-18) în (4-14), funcția de aproximare a necunoscutelor devine:

$$T^{(e)} = \frac{1}{h} \cdot (T_i^{(e)} \cdot x_j - T_j^{(e)} \cdot x_i) + \frac{1}{h} \cdot (T_j^{(e)} - T_i^{(e)}) \cdot x \quad (4-19)$$

$$T^{(e)} = \frac{1}{h} \cdot (x_j - x) \cdot T_i^{(e)} + \frac{1}{h} \cdot (x - x_i) \cdot T_j^{(e)} \quad (4-20)$$

- Coeficienții termenilor $T_i^{(e)}$ și $T_j^{(e)}$ din relația (4-20) sunt cunoscuți în literatura de specialitate [90], [92], [91] sub denumirea de funcții de interpolare la nivel de EF, prin care se determină valoarea aproximărilor necunoscutelor T_i și T_j pentru fiecare element finit analizat, cu variația liniară a valorilor de temperatură între cele două noduri ale EF (vezi Fig. 4.4).

$$T_{EFn}^{(e)} = F_i^{(e)} \cdot T_i + F_j^{(e)} \cdot T_j \quad (4-21)$$

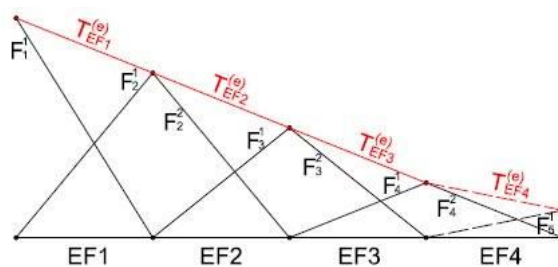


Fig. 4.4 Aproximarea funcției $T_{EFn}^{(e)}$ pe subdomenii prin intermediul funcțiilor de interpolare

Pas 3 Asamblarea ecuațiilor elementare în vederea formulării globale a problemei (în formularea variațională)

- Utilizând funcțiile de interpolare la nivel de element finit se assemblează funcția de interpolare la nivel global.

$$T = \sum_{n=1}^4 T_{EFn}^{(e)} \quad (4-22)$$

- Revenind la eq. (4-13), în formularea Galerkin se impune condiția ca funcția de interpolare care aproximează necunoscutele să fie egală cu funcția pondere [90], [92]. Pentru această condiție îndeplinită, coroborat cu relația (4-22), relația (4-13) devine:

$$\int_0^1 \left[\lambda \cdot \frac{d}{dx} \Sigma(F_i^{(e)} \cdot T_i) \right] \cdot \frac{d}{dx} \Sigma(F_j^{(e)} \cdot T_j) dx = -q \cdot \Sigma(F_i^{(e)} \cdot T_i) \Big|_0^1 \quad (4-23)$$

- Fiecare termen al relației (4-23) se derivează în raport cu valorile nodale ale necunoscutei T și se egalează cu 0 pentru a determina minimumul. Procesul de obținere a diferențialelor, practic, determină coeficienții matricii de “rigiditate” globale și a vectorului coloană al condiții de contur global în mod direct, fără construirea prealabilă a matricilor la nivel de element finit (care este metoda utilizată de regulă [90], [91]). Metoda utilizată în acest exemplu este semnalată de Zimmerman [92].

Pas 4 Formularea globală a problemei

- Se revine la exemplul analizat, termenul din stânga devine:

$$K = \begin{bmatrix} \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_1}{dx} \frac{dF_1}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_1}{dx} \frac{dF_2}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_1}{dx} \frac{dF_3}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_1}{dx} \frac{dF_4}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_1}{dx} \frac{dF_5}{dx} \\ \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_2}{dx} \frac{dF_1}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_2}{dx} \frac{dF_2}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_2}{dx} \frac{dF_3}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_2}{dx} \frac{dF_4}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_2}{dx} \frac{dF_5}{dx} \\ \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_3}{dx} \frac{dF_1}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_3}{dx} \frac{dF_2}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_3}{dx} \frac{dF_3}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_3}{dx} \frac{dF_4}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_3}{dx} \frac{dF_5}{dx} \\ \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_4}{dx} \frac{dF_1}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_4}{dx} \frac{dF_2}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_4}{dx} \frac{dF_3}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_4}{dx} \frac{dF_4}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_4}{dx} \frac{dF_5}{dx} \\ \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_5}{dx} \frac{dF_1}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_5}{dx} \frac{dF_2}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_5}{dx} \frac{dF_3}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_5}{dx} \frac{dF_4}{dx} & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dF_5}{dx} \frac{dF_5}{dx} \end{bmatrix} \quad (4-24)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

- Pentru termenul din dreapta se obține vectorul coloană al condițiilor de contur:

$$B = - \begin{bmatrix} q \cdot F_1 \Big|_0^1 \\ q \cdot F_2 \Big|_0^1 \\ q \cdot F_3 \Big|_0^1 \\ q \cdot F_4 \Big|_0^1 \\ q \cdot F_5 \Big|_0^1 \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

- Astfel, relația (4-23) se poate scrie sub forma matricială globală:

$$[K] \cdot \{T\} = \{B\} \quad (4-27)$$

Pas 5 Rezolvarea numerică a sistemului matriceal

$$h = x_i - x_j = 0.25$$

$$F_i = \frac{1}{l}(x_j - x)$$

$$F_j = \frac{1}{l}(x - x_i)$$

EF 1

$$K_{11} = \int_0^{0.25} \lambda \cdot \frac{dF_1^1}{dx} \cdot \frac{dF_1^1}{dx} dx = \int_0^{0.25} 2 \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) dx = 8$$

$$K_{12} = \int_0^{0.25} \lambda \cdot \frac{dF_1^1}{dx} \cdot \frac{dF_2^1}{dx} dx = \int_0^{0.25} 2 \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) dx = -8$$

$$K_{13} = K_{14} = K_{15} = 0$$

EF 2

$$K_{21} = K_{12} = -8$$

$$\begin{aligned} K_{22} &= \int_0^{0.5} \lambda \cdot \frac{dF_2}{dx} \cdot \frac{dF_2}{dx} dx = \int_0^{0.25} \lambda \cdot \frac{dF_2^1}{dx} \cdot \frac{dF_2^1}{dx} dx + \int_{0.25}^{0.5} \lambda \cdot \frac{dF_2^2}{dx} \cdot \frac{dF_2^2}{dx} dx = \\ &= \int_0^{0.25} 2 \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) dx + \int_{0.25}^{0.5} 2 \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) dx = 16 \end{aligned}$$

$$K_{23} = \int_{0.25}^{0.5} \lambda \cdot \frac{dF_2^2}{dx} \cdot \frac{dF_3^1}{dx} dx = \int_{0.25}^{0.5} 2 \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) dx = -8$$

$$K_{24} = K_{25} = 0$$

EF3

$$K_{31} = 0$$

$$K_{32} = K_{23} = -8$$

$$\begin{aligned} K_{33} &= \int_{0.25}^{0.75} \lambda \cdot \frac{dF_3}{dx} \cdot \frac{dF_3}{dx} dx = \int_{0.25}^{0.5} \lambda \cdot \frac{dF_3^1}{dx} \cdot \frac{dF_3^1}{dx} dx + \int_{0.5}^{0.75} \lambda \cdot \frac{dF_3^2}{dx} \cdot \frac{dF_3^2}{dx} dx = \\ &= \int_{0.25}^{0.5} 2 \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) dx + \int_{0.5}^{0.75} 2 \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) dx = 16 \end{aligned}$$

$$K_{34} = \int_{0.5}^{0.75} \lambda \cdot \frac{dF_3^2}{dx} \cdot \frac{dF_4^1}{dx} dx = \int_{0.5}^{0.75} 2 \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) dx = -8$$

$$K_{35} = 0$$

EF4

$$K_{41} = K_{42} = 0$$

$$K_{43} = K_{34}$$

$$\begin{aligned} K_{44} &= \int_{0.5}^1 \lambda \cdot \frac{dF_4}{dx} \cdot \frac{dF_4}{dx} dx = \int_{0.5}^{0.75} \lambda \cdot \frac{dF_4^1}{dx} \cdot \frac{dF_4^1}{dx} dx + \int_{0.75}^1 \lambda \cdot \frac{dF_4^2}{dx} \cdot \frac{dF_4^2}{dx} dx = \\ &= \int_{0.5}^{0.75} 2 \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) dx + \int_{0.75}^1 2 \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) dx = 16 \end{aligned}$$

$$K_{45} = \int_{0.75}^1 \lambda \cdot \frac{dF_4^2}{dx} \cdot \frac{dF_5^1}{dx} dx = \int_{0.75}^1 2 \cdot \left(-\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) dx = -8$$

EF5

$$K_{51} = K_{52} = K_{53} = 0$$

$$K_{54} = K_{45}$$

$$K_{55} = \int_{0.75}^1 \lambda \cdot \frac{dF_5^1}{dx} \cdot \frac{dF_5^1}{dx} dx = \int_{0.75}^1 2 \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) \cdot \left(\frac{1}{0.25}\right) dx = 8$$

Se obține astfel matricea de rigiditate globală sub forma unei matrici bandă.

$$K = \begin{bmatrix} 8 & -8 & 0 & 0 & 0 \\ -8 & 16 & -8 & 0 & 0 \\ 0 & -8 & 16 & -8 & 0 \\ 0 & 0 & -8 & 16 & -8 \\ 0 & 0 & 0 & -8 & 8 \end{bmatrix}$$

În ceea ce privește vectorul coloană al condițiilor de contur global, se impune condiția de tip Neumann (în stânga, pentru $x = 0$), cu valoare impusă în nodul 1, cu valoare 0 pentru restul liniilor, 0 având semnificația că nu este impusă condiție de tip Neumann în nodurile intermediare și în ultimul nod.

$$B = - \begin{bmatrix} q \cdot F_1^* |_{x=0} \\ q \cdot F_2^* \\ q \cdot F_3^* \\ q \cdot F_4^* \\ q \cdot F_5^* \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} q \cdot F_1^* \cdot \cos 180^\circ \\ q \cdot F_2^* \\ q \cdot F_3^* \\ q \cdot F_4^* \\ q \cdot F_5^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Privitor la legea lui Fourier și la condițiile de contur se face observația că *legea lui Fourier (4-4) constituie condiție de tip Neumann* (derivata variabilei necunoscute în condițiile de contur). Astfel că, pentru $x = 0$ condițiile de contur propuse pentru acest exemplu pot fi scrise și sub forma de mai jos, cu rezultate identice:

$$6 = -2 \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \rightarrow \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = 3 \text{ K/m}$$

Relația (4-27) se rescrie sub forma:

$$\begin{bmatrix} 8 & -8 & 0 & 0 & 0 \\ -8 & 16 & -8 & 0 & 0 \\ 0 & -8 & 16 & -8 & 0 \\ 0 & 0 & -8 & 16 & -8 \\ 0 & 0 & 0 & -8 & 8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

În final se aplică și condiția de tip Dirichlet pentru nodul 5. Aplicarea condiției Dirichlet în sistemul matriceal, permite eliminarea ultimei linii și a ultimei coloane din matricea bandă (T_5 fiind cunoscută în acest exemplu). Această caracteristică este importantă pentru că reduce dimensiunile matricii bandă [93], [90], respectiv numărul de ecuații algebrice din care se determină necunoscutele (temperaturile în nodurile elementelor finite). Relația (4-27) devine:

$$\begin{bmatrix} 8 & -8 & 0 & 0 \\ -8 & 16 & -8 & 0 \\ 0 & -8 & 16 & -8 \\ 0 & 0 & -8 & 16 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Din această relație matriceală se determină vectorul temperaturilor pentru fiecare nod, prin rezolvarea unui sistem de ecuații algebrice cu patru necunoscute.

$$T = \begin{bmatrix} 3 \\ 2.25 \\ 1.5 \\ 0.75 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Acest exemplu a fost prezentat cu scopul de demonstra aplicarea condițiilor de contur Dirichlet și Neumann, utilizând metoda elementului finit, unei ecuații de transfer de căldură în regim staționar, fără surse de căldură.

Se face observația că în rezolvarea eq. (4-9) cu metoda elementului finit, legea lui Fourier (4-4) reprezintă condiție de tip Neumann.

Valorile coeficienților superficiali de transfer termic introduși în modelele numerice ca și valori constante de flux reprezintă condiții de tip Neumann. Valorile de temperatură reprezintă condiții de tip Dirichlet. Combinarea celor două tipuri de condiții la limită, reprezintă condiții de tip Robin sau condiții de speța a III-a.

Pentru sisteme bidimensionale și tridimensionale, sistemele de matrici sunt foarte mari (de ordinul miilor de linii și coloane pentru matricea de "rigiditate"), iar rezultatele se obțin doar prin utilizarea de programe numerice de calcul.

În România, unul dintre pionierii automatizării calculelor de transfer de flux termic prin rezolvarea ecuației căldurii în regim staționar cu metode numerice este Emil Comșa, prin utilizarea metodei diferențelor finite, la nivelul anilor '78-80 [88]. Timp de 40 ani programele de calcul s-au dezvoltat foarte mult, ca efort comun al cercetătorilor în matematică, informatică și inginerie din întreaga lume, permițând ca fenomenele caracteristice domeniului să poată fi studiate, cu scopul obținerii de informații specifice, în vederea identificării și aplicării la scară largă a metodelor noi de calcul sau a soluțiilor tehnice inovative pentru clădirile reale, care sunt obiectul principal al cercetării în domeniul ingineriei civile.

Obiectivele acestei teze nu cuprind elaborarea unui program de calcul, focusul fiind îndreptat spre studiul fenomenului fizic al transferului de căldură în sol la interacțiunea cu clădirile de mari dimensiuni în anumite condiții.

4.1.3 Aplicarea teoriei similitudinii în modelul de calcul de transfer termic în regim nestaționar

Utilizarea teoriei similitudinii în analizele experimentale permite scalarea modelului studiat, reducând resursele necesare analizei.

Teoria similitudinii permite ca pornind de la ecuația diferențială a transferului de căldură să se determine ecuații criteriale, care să permită substituirea parametrilor inițiali ai modelului real cu parametrii introduși în modelul „simil” [87].

Scopul studiului în cadrul acestei teze este, de a identifica și propune un model simil adecvat, care să permită utilizarea metodelor numerice în vederea efectuării de studii comprehensive al transferului de căldură al plăcilor pe sol de dimensiuni mari și interacțiunea lor cu terenul, incluzând interacțiunea plăcilor cu pereții exteriori, în regim termic nestaționar pentru perioade investigate de lungă durată.

Caracteristicile urmărite pentru modelul simil sunt de a reduce modelul geometric analizat, cu păstrarea proprietăților fizice corespunzătoare modelului real, în scopul reducerii timpului de analiză și memoriei utilizate calculatorului, inclusiv a memoriei de stocaj necesară, respectiv pentru predicționarea răspunsului modelului studiat pe o durată de analiză mai îndelungată. Rezultatele ar fi anevoios de obținut din simularea directă, cu pas orar a modelului real, iar odată cu creșterea dimensiunii clădirii studiate, asemenea analize sunt încă aproape imposibil de efectuat la ora actuală.

Astfel, în vederea optimizării simulărilor în regim nestaționar a transferului de căldură în problematica studiată, se propune utilizarea unor criterii de similitudine termică, care să permită păstrarea corespondenței între modelul real și modelul simil, pentru a reflecta cât mai riguros procesul original de transfer termic.

Se utilizează următoarele criterii folosite în analiza experimentală a proceselor termoenergetice [94], [87], [95]:

Criteriul Biot (Bi) – care reprezintă raportul dintre rezistența termică interioară la conducție și cea exterioară la convecție pentru transferul de căldură între corpul solid și mediul ambiant (4-28).

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (4-28)$$

Criteriul Fourier (Fo) – reprezintă timpul de propagare a căldurii în unități adimensionale, fiind caracteristic proceselor de transfer de căldură în regim nestaționar (4-29).

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2} \quad (4-29)$$

unde:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (4-30)$$

Din respectarea egalității: $F_{oR} = F_{oS}$ și cu înlocuirea relației (4-30) în relația (4-29) se obține:

$$\frac{\lambda_R \cdot \tau_R}{(\rho \cdot c)_R \cdot l_R^2} = \frac{\lambda_S \cdot \tau_S}{(\rho \cdot c)_S \cdot l_S^2} \quad (4-31)$$

$$\frac{(\rho \cdot c)_S \cdot l_S^2 \cdot \lambda_R \cdot \tau_R}{(\rho \cdot c)_R \cdot l_R^2 \cdot \lambda_S \cdot \tau_S} = 1 \quad (4-32)$$

Din egalitatea $B_{iR} = B_{iS}$, rezultă:

$$\frac{\alpha_R \cdot l_R}{\lambda_R} = \frac{\alpha_S \cdot l_S}{\lambda_S} \quad (4-33)$$

Prin respectarea ipotezei că fluidul (aerul) adiacent solului își păstrează coeficientul de transfer termic superficial constant pe toată durata procesului de transfer de căldură, adică pe durata sezonelor de încălzire simulate, se aplică condiția $\alpha_R = \alpha_S$. Astfel, rezultă:

$$\lambda_S = \frac{l_S}{l_R} \cdot \lambda_R \quad (4-34)$$

$$l_S = \frac{\lambda_S}{\lambda_R} \cdot l_R \quad (4-35)$$

Prin utilizarea relației (4-34), relația (4-32) rezultă:

$$\frac{(\rho \cdot c)_S}{(\rho \cdot c)_R} \cdot \frac{l_S}{l_R} \cdot \frac{\tau_R}{\tau_S} = 1 \quad (4-36)$$

Se notează $r = \frac{\tau_R}{\tau_S}$, care reprezintă raportul între timpul real de analiză corespunzător perioadei studiate a procesului și timpul din modelul simil.

Rezultă caracteristica geometrică pentru modelul simil:

$$l_S = \frac{(\rho \cdot c)_R}{(\rho \cdot c)_S} \cdot l_R \cdot r \quad (4-37)$$

În mod analog, pentru $l_S = f(l_R, \lambda_R, \lambda_S)$ se obține:

$$\lambda_S = \frac{(\rho \cdot c)_R}{(\rho \cdot c)_S} \cdot \lambda_R \cdot r \quad (4-38)$$

În subcap. 4.3.3 se vor prezenta detaliat încercările efectuate pentru identificarea modelului simil satisfăcător, care va permite implementarea modelării numerice la plăci de dimensiuni foarte mari, cu realizarea unei similitudini complete cu modelul real și cu formularea relației analitice de calcul care permite extrapolarea rezultatelor fluxului termic integrat pe suprafața plăcii.

4.2 Condiții de analiză numerică

Pentru rezolvarea ecuațiilor diferențiale (4-7), (4-8) și a legii lui Fourier (4-4), care descriu transferul termic conductiv, se impun condițiile de determinare univocă a procesului de transfer termic. Pentru modelele studiate în acest capitol, condițiile sunt descrise în detaliu în paginile următoare.

4.2.1 Caracteristici geometrice

Studiile realizate vizează identificarea unor efecte specifice în transferul de căldură la plăci de dimensiuni mari.

Astfel, pentru studiul de referință se utilizează o placă din beton armat de dimensiunea 30x30 m, cu grosimea de 20 cm, amplasată pe o umplutură de pământ cu grosimea de 15 cm.

Modelul geometric cuprinde interacțiunea plăcii pe sol cu un perete de zidărie, cu grosimea de 29 cm, tencuit la interior cu 2 cm mortar de ciment și la exterior cu 3 cm mortar de ciment. Soluția de fundare pentru acest studiu științific general este de tip grindă de fundare dispusă perimetral sub pereți, cu dimensiunea secțiunii de 35 x 95 cm.

Geometria propusă respectă parțial prevederile SR EN 10211 [1], astfel că pereții sunt secționați cu un plan adiabatic la 1.00 m față de cota pardoselii.

Masivul de pământ pe care este amplasată clădirea modelată este de dimensiuni mari, perimetral clădirii având dimensiunea de 20 m măsurat de la fața exterioară a pereților.

Adâncimea solului în modelările numerice

Având în vedere că pentru studiile întreprinse în acest capitol, în ipoteza utilizării reglementărilor tehnice naționale (C107/5-2005 [3] și SR EN 10211[1] / SR EN 13370 [2]), există două modele de calcul aplicabile în mod curent, care utilizează două dimensiuni distincte pentru adâncimea în sol a modelului geometric (7 m sub CTS, respectiv 20 m sub CTS), respectiv ținând cont că modelele prezentate în aceste reglementări tehnice ingineresti sunt tot rezultatele unor cercetări științifice întreprinse în diverse perioade, s-a considerat oportun și necesar ca în cadrul acestei teze de doctorat să se facă studii suplimentare cu privire la acest subiect.

Astfel, în ceea ce privește alegerea adâncimii masivului de pământ în modelul analizat, pentru început s-au studiat rezultatele unor cercetări științifice:

Bahnfleth și Pedersen [96] au identificat un impact semnificativ în modelarea transferului de căldură în sol, în sensul apariției a unei diferențe de pierdere de căldură medie, între adâncimea de 10 m și cea de 15 m de până la 12%.

O observație privitor la acest rezultat este că devine foarte importantă identificarea adâncimii de la care temperatura solului este constantă și care, de fapt, trebuie să reprezinte limita inferioară a modelului.

Hillel [82] a utilizat un model analitic (4-39) pentru ecuația de transmitere a căldurii în regim nestaționar (4-7), pentru cazul unidirecțional (pe axa z), soluție ale cărei rezultate au fost ulterior comparate cu rezultatele unor monitorizări fizice efectuate de Wu și Nofziger [84], analizându-se temperaturile la 4 adâncimi distincte de: 0.05 m, 0.4 m, 0.8 m și 1.6 m sub CTS (cota terenului sistematizat), pe durata de 1080 de zile, observându-se corespondențe foarte bune între temperaturile calculate și temperaturile măsurate în sol. Utilizând acest model, se stabilește că temperatura solului devine constantă în jurul adâncimii de 10 m, indiferent de temperaturile exterioare, cu o influență neglijabilă a caracteristicilor solului (a coeficientului de difuzie). Acest model analitic este utilizat și în alte studii [97], chiar și anterior celor întreprinse de Hillel [98].

$$T(z,t) = T_{z=\infty} + A_{z=0} \cdot e^{-z/d} \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{\tau} - \frac{z}{d}\right] \quad (4-39)$$

Parametrul d [m] reprezintă adâncimea amortizată, în funcție de proprietățile solului și de fluctuația temperaturilor în timp:

$$d = \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{\tau}} \quad (4-40)$$

Bălan et al. [83] au realizat o monitorizare a temperaturilor în sol la adâncimile de: 0.18 m, 0.4 m, 0.89 m și 2 m de la CTS, în Cluj-Napoca și Reghin, pe intervale relevante de timp (1 mai 2009 – 8 octombrie 2010 la Cluj-Napoca, respectiv 17 octombrie 2009 – 26 iunie 2010 la Reghin) și au propus o metodă care permite determinarea variației temperaturilor, determinând temperatura în sol până la adâncimea de 10 m, adâncime la care temperatura pământului devine aproape constantă, în studiul lor observându-se că amplitudinea variației temperaturilor în sol este deja mult mai redusă la adâncimea de 5 m.

Având aceste rezultate ale unor cercetări științifice ca bază de pornire, s-a elaborat un studiu numeric pentru determinarea variației temperaturii în sol pentru o adâncime aleasă în mod arbitrar, cu scopul identificării la ce adâncime a solului variația amplitudinii temperaturii devine neglijabilă, independent de adâncimea la care se impune în modelul numeric condiția de temperatură constantă.

Astfel, utilizând condițiile descrise pe larg în subcap. 4.2.2 și subcap. 4.2.3 (Fig. 4.9, respectiv Tab. 4.5), s-a rezolvat numeric ecuația căldurii în regim nestaționar (4-7) pentru cazul unidirecțional, rezultatele obținute fiind prezentate în Fig. 4.5. Totodată, se face precizarea că valorile de temperatură în sol prezentate pentru data de 01 a fiecărei luni a anului calendaristic, ora 01:00 (noaptea), au fost utilizate după ce regimul cvasi-staționar a fost atins.

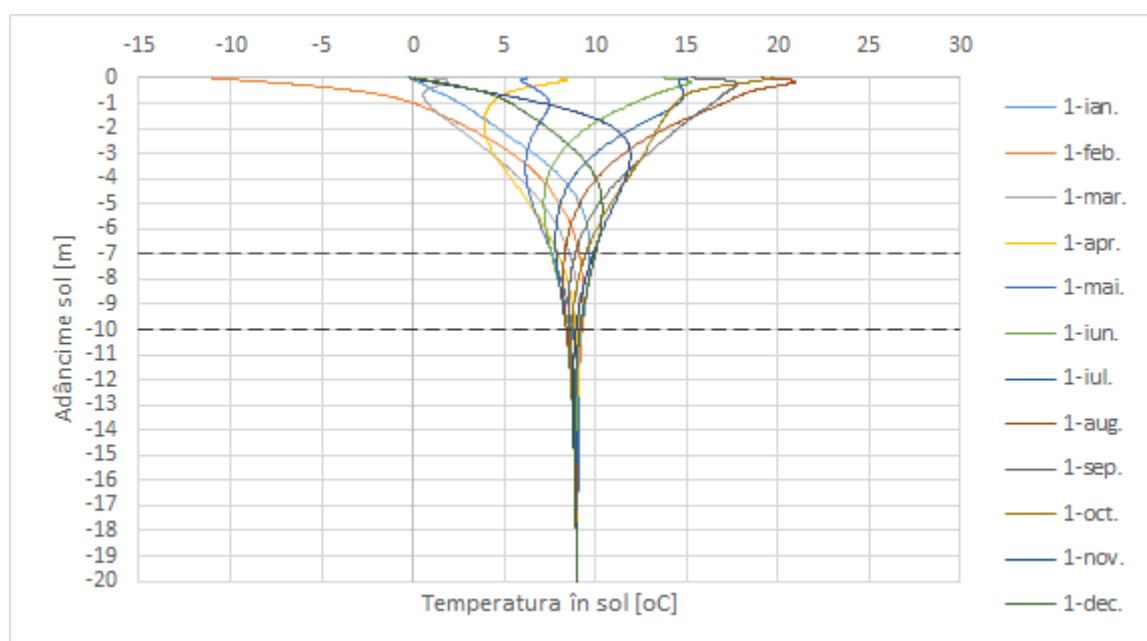


Fig. 4.5 Variația temperaturii în sol cu adâncimea la Cluj-Napoca pentru un an calendaristic (profil de temperatură reprezentat pentru ziua 01 a lunii i , ora 01:00)

Din Fig. 4.5 se poate observa că amplitudinea variației temperaturii este într-adevăr deja mult redusă la adâncimea de 7 m sub CTS, însă o amplitudine neglijabilă a variației temperaturii în sol, care să permită formularea ipotezei de calcul numeric de temperatură constantă a solului, independent de limita inferioară a modelului (adâncimea) la care se face studiul propagării temperaturii în sol în regim nestaționar, se poate considera de la adâncimea de 10 m în jos sub cota CTS. Concluziile care rezultă din acest studiu numeric sunt în deplină concordanță cu rezultatele obținute prin rezolvările analitice ale ecuației căldurii menționate mai sus [82], [84], [83].

Astfel, în baza observațiilor și a rezultatelor de mai sus, se consideră că nu se justifică o modelare pe o adâncime mai mare de 10 m, pentru că rezultatele nu mai sunt corespunzătoare cu modelul fizic real al distribuției temperaturilor în sol, iar o adâncime aleasă necorespunzător (fără ca această corelare să fie făcută) pentru model, poate duce la erori ale rezultatelor. În concluzie, pentru modelările efectuate în acest capitol adâncimea solului se consideră 10 m.

În vederea reducerii timpului de calcul, modelul se reduce la studiul unei plăci pe sol bisimetrice, astfel că geometria plăcii se reduce la un sfert din placă (vezi Fig. 4.6), model care permite studierea influenței interacțiunii cu peretele, pe lungimea și la colțul peretelui, respectiv zona centrală a acesteia, pe model tridimensional, cu variația temperaturii în timp.

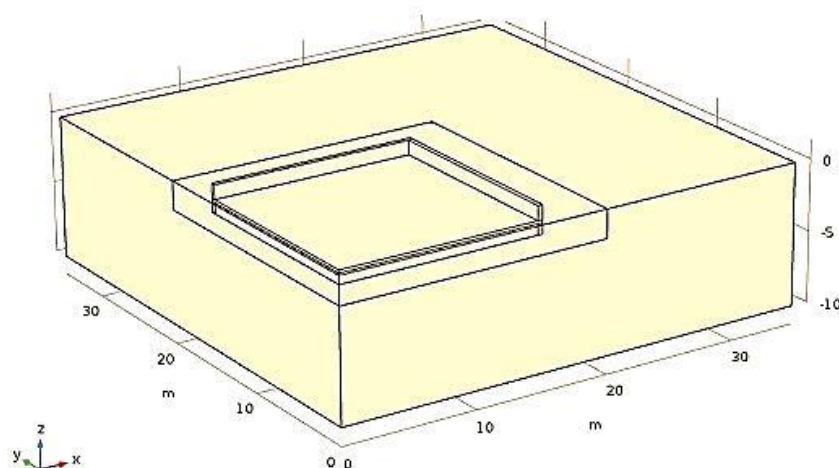


Fig. 4.6 Colț bisimetric al plăcii pe sol de dimensiune 30x30 m

4.2.2 Condiții de contur

Condițiile de contur utilizate sunt condiții la limită de ordinul III, în care este introdusă temperatura fluidului care înconjoară corpul și legea de transfer de căldură între corp și fluid [87], [99].

Pentru modelul propus, temperatura interioară introdusă este temperatura aerului, iar transferul prin convecție și radiație la suprafața elementelor de construcție este introdus simplificat sub forma coeficienților superficiali de transfer termic. Condițiile de contur sunt condiții de tip Fourier sau condiții de speța a III-a, care permit utilizarea temperaturii fluidului (aerul) care se află în contact cu suprafața elementului solid analizat, prin folosirea legii de conservare a densității fluxului termic la suprafața de separație solid-fluid (Tab. 4.3).

Modele comprehensive ale condițiilor de contur

Formulări matematice sub forma unor ecuații a unor modele comprehensive ale convecției naturale dintre elementul constructiv și aerul înconjurător, au fost dezvoltate de mai mulți cercetători [100], [101], [102], dintre care printre cele mai cunoscute sunt cele dezvoltate de Walton [100] pentru suprafețe verticale și orizontale în cazul convecției la condiții de interior, fiind enunțate ecuațiile (4-41), (4-42) și (4-43):

$$\alpha_{ci} = 1.31 \cdot (T_{si} - T_a)^{1/3} \quad - \text{ pentru flux orizontal;} \quad (4-41)$$

$$\alpha_{ci} = \frac{1.810 \cdot (T_{si} - T_a)^{1/3}}{1.328 + \cos\beta} \quad - \text{ pentru flux ascendent cu } T_{si} > T_a \text{ sau} \\ \text{flux descendent cu } T_{si} < T_a; \quad (4-42)$$

$$\alpha_{ci} = \frac{9.482 \cdot (T_{si} - T_a)^{1/3}}{7.283 - \cos\beta} \quad - \text{ pentru flux ascendent cu } T_{si} < T_a \text{ sau} \\ \text{flux descendent cu } T_{si} > T_a. \quad (4-43)$$

unde:

β – unghiul de înclinare al suprafeței (cu valoarea 0 într-un plan orizontal, orientat în sus, cu parcurgere în sens trigonometric) [rad].

Pentru condițiile de exterior aferente fenomenului de transfer termic prin convecție de suprafață există mai multe ecuații elaborate de Nusselt, McAdams și Mitchell [103] care permit determinarea unui flux convectiv pentru fiecare pas de timp al simulării, în funcție de viteza înregistrată a vântului, relații similare cu cea introdusă în standardul SR EN 6946 [75] - ecuația (4-44), sau modele mai complexe, în care se ține cont și de rugozitatea materialelor, presiunea și suucțiunea vântului, printr-o componentă de convecție forțată [104] pe lângă cea naturală, care este calculată în mod similar cu convecția în condiții de interior [100].

$$\alpha_{ce} = 4 + 4 \cdot v \quad (4-44)$$

Relațiile enunțate mai sus permit calculul unei valori distincte a fluxului din convecția pe suprafața elementului de construcție, pentru fiecare pas de timp, însă pentru că obiectivul studiilor întreprinse este de a evidenția un fenomen fizic specific transferului de căldură spre sol la clădiri de dimensiuni mari și de a cuantifica valoric efectele acestuia, s-a optat pentru un model “curat”. Valoarea coeficientului superficial de transfer termic prin convecție s-a introdus sub formă de valori constante, în funcție de direcția și sensul curgerii fluxului pentru condiții de interior, respectiv pentru o viteză constantă a vântului de 4 m/s pentru condițiile exterioare.

În ceea ce privește schimbul de căldură la suprafață prin radiație, aceasta este separată în radiație de undă lungă, specifică relației clădirii cu mediul înconjurător, și radiația de undă scurtă cum este radiația solară.

Privitor la radiația de undă lungă la interior, legea de transfer radiativ între suprafața interioară a elementului de construcție și alte suprafețe interioare aflate la temperatura ambientă, T_a , este definită conform relațiilor (4-45) și (4-46) [105]:

$$q_{ri} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{si}^4 - T_a^4) \quad (4-45)$$

$$\alpha_{ri} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{si}^2 + T_a^2) \cdot (T_{si} + T_a) \quad (4-46)$$

Relația (4-46) este introdusă sub formă simplificată în SR EN 6946 [75], prin înlocuirea termenilor care conțin T_{si} și T_a , cu temperatura termodinamică medie a suprafeței și a mediului ambiant al acesteia, T_m , astfel că relația devine (4-47).

$$\alpha_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 \quad (4-47)$$

În ceea ce privește radiația de undă lungă la exterior, aceasta se produce între suprafețele exterioare ale clădirii și suprafața solului, bolta cerească, respectiv alte suprafețe exterioare. Conform ASHRAE [27] și Walton [100] fluxul pe suprafață din fenomenul de transfer prin radiație este compus din radiația care se transmite între clădire și elementele înconjurătoare ale clădirii, pe componente: element constructiv – suprafață sol, element constructiv – bolta cerească și element constructiv – alte suprafețe exterioare la temperatura ambiantă, T_a , conform relației (4-48), iar coeficienții dinamici de transfer termic superficial din radiație se determină prin intermediul relațiilor (4-49), (4-50) și (4-51):

$$q_{re} = \alpha_{re.sol} \cdot (T_{sol} - T_{se}) + \alpha_{re.cer} \cdot (T_{cer} - T_{se}) + \alpha_{re.a} \cdot (T_a - T_{se}) \quad (4-48)$$

$$\alpha_{re.sol} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{sol} \cdot (T_{se}^4 - T_{sol}^4)}{T_{se} - T_{sol}} \quad (4-49)$$

$$\alpha_{re.cer} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{cer} \cdot (T_{se}^4 - T_{cer}^4)}{T_{se} - T_{cer}} \quad (4-50)$$

$$\alpha_{re.a} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot F_a \cdot (T_{se}^4 - T_a^4)}{T_{se} - T_a} \quad (4-51)$$

$$F_{sol} = 0.5 \cdot (1 - \cos \beta) \quad (4-52)$$

$$F_{cer} = 0.5 \cdot (1 + \cos \beta) \quad (4-53)$$

unde:

F – factor de poziție relativă (“view factor”), care reprezintă fracția din radiația care părăsește suprafața elementului constructiv și este interceptată de către suprafața solului, bolta cerească sau alte suprafețe exterioare, cu valori în intervalul [0,1].

Se consideră temperatura suprafeței solului egală cu temperatura celorlalte suprafețe exterioare din jurul clădirii aflate la temperatura mediului ambiant, respectiv că între valoarea lui F_{cer} și F_a există relația (4-54):

$$F_a = F_{cer} \cdot (1 - \sqrt{0.5 \cdot (1 + \cos \beta)}) \quad (4-54)$$

Cealaltă componentă a schimbului de căldură prin radiație la suprafața elementelor de construcție este radiația de undă scurtă, din radiația solară incidentă absorbită de suprafață (directă și difuză). Aceasta este influențată de amplasamentul clădirii, gradul de înnoare, proprietățile materialelor, etc..

Pentru condiții de interior, utilizarea unor modele comprehensive poate fi relevantă în momentul utilizării unor elemente ale construcției ca elemente de stocaj a energiei (pardoseală, diafragme din beton armat) dispuse constructiv astfel încât să fie încălzite prin suprafețele vitrate sau când se ia în considerare radiația surselor interne.

Pentru condiții de exterior, componenta de radiație este relevantă în momentul efectuării studiului umbririi și a efectelor acesteia, produs de clădire asupra terenului înconjurător sau umbrirea produsă de către alte clădiri asupra clădirii studiate.

Introducerea unor condiții de contur comprehensive implică determinarea unor coeficienți dinamici de transfer termic superficial și a unui flux termic la suprafață pentru fiecare pas de timp. Condițiile de contur comprehensive fiind neliniare, în algoritmi iterativi de calcul au ca efect creșterea duratei computaționale.

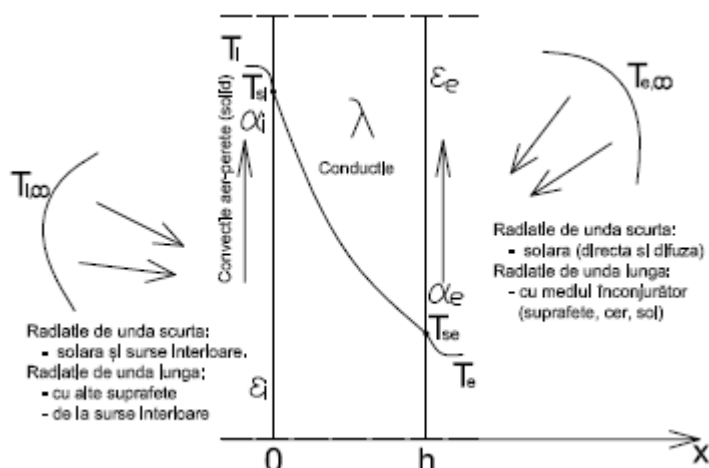


Fig. 4.7 Transferul de căldură într-un perete plan - model comprehensiv

Tab. 4.3 Centralizator condiții de contur

Condiții de contur neliniare		
$x = 0$ Stânga	$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=0} = \alpha_i \cdot (T_i - T_{si}) + \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot [T_{i,\infty}^4 - T_{si}^4]$	
$x = h$ Dreapta	$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=h} = \alpha_e \cdot (T_e - T_{se}) + \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot [T_{e,\infty}^4 - T_{se}^4]$	
Condiții de contur liniare		
Tip condiție	$x = 0$ Stânga	$x = h$ Dreapta
I Dirichlet	$T_{x=0} = T_{si}$	$T_{x=h} = T_{se}$
II Neumann	$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=0} = q_{i1}$	$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=h} = q_{e1}$
Caz particular (limita adiabatică):	$-\frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=0} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=h} = 0$
Legea de conservare a densității fluxului termic		
III Fourier	$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=0} = \alpha_i \cdot (T_i - T_{si})$	$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=h} = \alpha_e \cdot (T_e - T_{se})$
III Robin	$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=0} + \alpha_i \cdot (T_i - T_{si}) = q_{i1}$	$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=h} + \alpha_e \cdot (T_e - T_{se}) = q_{e2}$

unde:

$T_{i,\infty}$, $T_{e,\infty}$ - temperatura suprafețelor la temperatura ambiantă, situate la distanță de elementul analizat.

Privitor la condiția la limită de tip Robin se fac următoarele precizări, semnalate des în literatura de specialitate [99], [106], [93], [107]:

- Pentru $\alpha \rightarrow \infty$, condiția de temperatură este predominantă, astfel că condiția de contur va fi de tip Dirichlet;
- Pentru $\alpha \rightarrow 0$, condițiile de contur devin condiții de tip Neumann;
- În ipoteza că $q_2 = 0$ și $\alpha = 0$, rezultă limita adiabatică sau un caz particular al condițiilor de tip Neumann.

Coroborat cu tematica studiată în acest capitol, care presupune modele numerice complexe, care necesită la rândul lor resurse computaționale semnificative, s-a optat pentru condiții de contur simplificate, cu introducerea unor coeficienți superficiali de transfer termic cu valori constante.

Astfel, în modelele analizate în acest capitol s-au introdus condiții de contur liniare de ordinul III, sub forma unor funcții de tip $f(t) = T$ pentru temperaturile orare, respectiv valori numerice constante pentru transferul prin convecție și radiație la suprafață, sub forma coeficienților superficiali de transfer termic α_i și α_e .

Pentru limitele de secționare ale modelului se utilizează limite adiabatică, sau cazul particular al condițiilor la limită de ordinul II (condiții Neumann), când fluxul termic la suprafață este nul.

Condiții de contur pentru interior

Pentru simulările numerice în regim staționar, temperatura în interiorul clădirii este considerată 20°C. Pentru simulările numerice în regim nestaționar, studiul este făcut la nivelul mai multor ani, însă datele de intrare corespund temperaturilor orare ale unui singur an calendaristic, iar apoi se repetă pentru următorii ani.

Se consideră durata sezonului de încălzire începând cu 15 octombrie, ora 1 până în 15 aprilie, ora 24. Pe durata sezonului de încălzire, în interiorul clădirii se consideră temperatura interioară constantă de 20°C, iar pe durata de neîncălzire s-a propus o variație a temperaturilor interioare ca în Fig. 4.8.

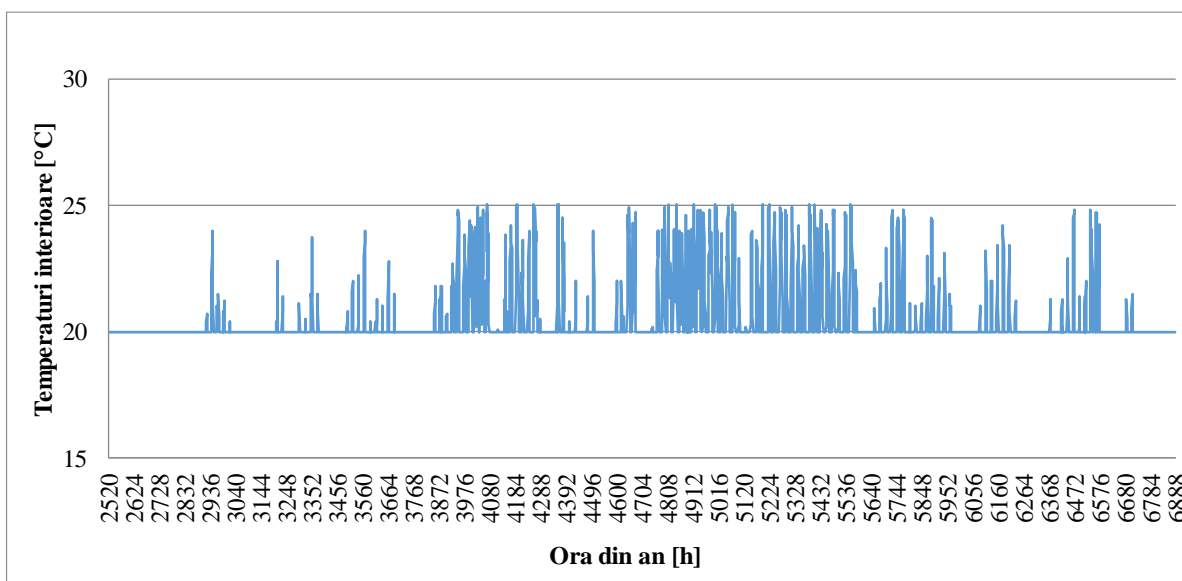


Fig. 4.8 Temperaturi interioare pe durata perioadei de neîncălzire

S-a definit funcția $T_{int}(t)$, în care s-a utilizat numerotarea globală a orelor din anii investigați, și a cărei descriere este următoarea:

Tab. 4.4 Definirea temperaturilor interioare în funcția $T_{int}(t)$

Perioada analizată	Anul	Numerotare locală		Numerotare globală		Temperatura
		Ora	Ora	Ora	Ora	
[-]	[-]	[h]	[h]	[h]	[h]	[°C]
Sezon 1 de încălzire	AN 1	6889	8760	6889	8760	20
	AN 2	1	2520	8760	11280	20
Perioadă de neîncălzire	AN 2	2520	6889	11280	15649	$\max(\min((Text(t)),25),20)$
Sezon 2 de încălzire	AN 3	6889	8760	15649	17520	20
	AN 3	1	2520	17520	20040	20
...
Sezon n de încălzire	AN n	6889	8760	20
	AN n+1	1	2520	20

Coeficienții superficiali de transfer termic au următoarele valori:

- Pentru flux orizontal: $\alpha_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
- Pentru flux vertical descendent: $\alpha_i = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Condiții de contur pentru exterior

Se definește funcția de interpolare $T_{ext}(t)$, careia la fiecare pas de timp $t = 1..8760 \text{ h}$, îi corespunde o temperatură exterioară orară înregistrată, datele fiind preluate din baza de date ASHRAE pentru municipiul Cluj-Napoca (vezi Fig. 4.9). Se utilizează aceleași temperaturi exterioare din anul curent pentru toți anii investigați.

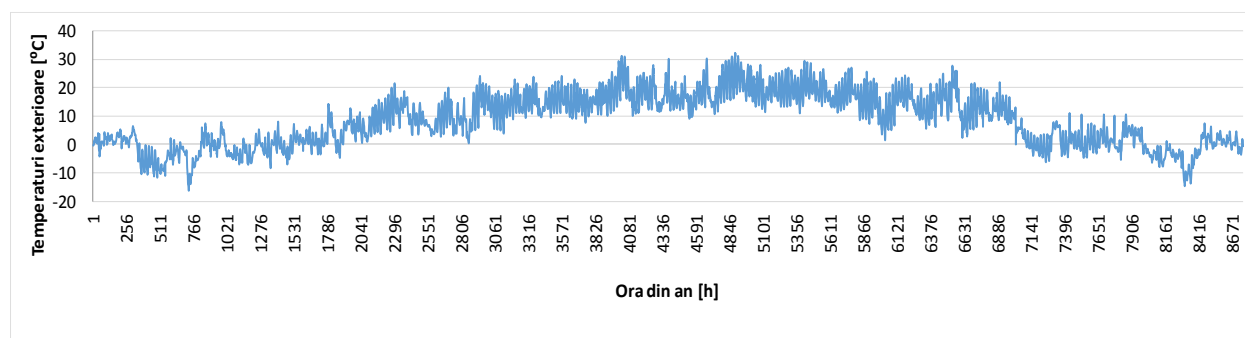


Fig. 4.9 Temperaturi exterioare orare pentru Cluj-Napoca, România [°C]

Valoarea coeficientului de transfer termic superficial (convectiv și radiativ) pentru flux orizontal/vertical descendent este $\alpha_e = 24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Condiții de contur pentru limita inferioară sol

Se definește o condiție de contur de tip temperatură constantă pe suprafața frontierei modelului (un caz particular al condițiilor de tip Dirichlet, în care suprafața corpului este izotermă în timp [87]) $T_s = 9^\circ\text{C}$, condiție pentru care variabila dependentă (temperatura) este prescrisă, practic, eliminându-se ecuațiile care ar determina temperatura în aceste noduri (grade de libertate) și modificând structura matricii de rigiditate, așa cum s-a putut observa și în exemplul dat în subcap. 4.1.2.

4.2.3 Caracteristici termotehnice material

Proprietăți sol

Este binecunoscut că solul este asimilabil unui material cu schimbare de fază (PCM), pentru că valorile capacității calorice volumetrică și a conductivității termice diferă în funcție de fracția de minerale, lichid și gaz din material, care își modifică proprietățile funcție de starea în care se află materialul (îngheț, procent de umiditate).

Capacitatea calorică volumetrică definită de de Vries [108] este o medie ponderată cu fracțiunea componentelor (în unități de volum) (4-55):

$$C = \Sigma (f_s \cdot C_s) + f_w \cdot C_w + f_a \cdot C_a \quad (4-55)$$

Capacitatea calorică volumetrică, pe tip de component, se determină ca și produs între densitatea aparentă a pământului în stare uscată și capacitatea calorică masică.

$$C_s = \rho_s \cdot c_s$$

$$C_w = \rho_w \cdot c_w$$

$$C_a = \rho_a \cdot c_a$$

Conductivitatea termică variază în funcție de porozitate, umiditate, de compoziția minerală și organică a fracției solide, precum și de starea solului în raport cu fenomenul de îngheț. În studiile întreprinse, Hillel [82] a constatat că cele două caracteristici de material variază în funcție de aceeași parametri, însă variația conductivității termice este mult mai mare decât a capacității calorice volumice, pentru aceeași variație a parametrilor care influențează caracteristicile.

Caracteristicile termotehnice ale solului utilizate în modelul de referință studiat sunt prezentate în Tab. 4.5.

Tab. 4.5 Caracteristici termotehnice sol

Caracteristici termotehnice sol	Unitate de măsură	Valoare de calcul	
		Masivul de pământ	Umplutură de pământ
Conductivitate termică, λ	W/(mK)	2	1.16
Densitate aparentă, ρ	kg/m ³	1800	1800
Capacitate calorică masică, c	J/(kgK)	1110	840

Proprietățile termotehnice ale celorlalte materiale introduse în modelul de calcul sunt prezentate în Tab. 4.6.

Tab. 4.6 Caracteristici termotehnice ale materialelor de construcție

Caracteristici termotehnice clădire	Unitate de măsură	Perete din zidărie			Placă pe sol
		Zidărie de cărămidă	Tencuială mortar de ciment	Valoare echiv. *	Beton armat
Conductivitate termică, λ	W/(mK)	0.8	0.93	0.8095	1.74
Densitate aparentă, ρ	kg/m ³	1800	1800	1800	2500
Capacitate calorică masică, c	J/(kgK)	840	840	840	840

*Modelul geometric general fiind foarte complex, în vederea reducerii numărului de noduri în rețeaua de discretizare din perete, în model s-a introdus un material echivalent pentru peretele din zidărie.

4.2.4 Condiții inițiale în cazul simulărilor în regim nestaționar

Inițializarea modelării

Modelarea numerică a transferului de căldură în sol în regim nestaționar necesită o etapă premergătoare analizei propriu-zise, de inițializare a câmpului de temperaturi. Inițializarea modelării se poate face prin mai multe metode:

- inițializare prin determinarea câmpului de temperaturi inițial printr-o simulare în regim staționar;
- prin utilizarea unei temperaturi inițiale constante;
- prin metoda Kusuda & Achenbach [109];
- prin metoda dezvoltată de Kruis [105], printr-o inițializare accelerată a câmpului de temperaturi în două etape de presimulare pornind de la o simulare în regim staționar.

Pentru studiile din această teză a fost luată în considerare prima metodă, pentru care s-a dezvoltat și o variantă, determinând influența acesteia asupra modelelor numerice studiate. În aplicarea variantei clasice a metodei se efectuează două studii: primul, în regim staționar pentru prima oră din sezonul de încălzire, iar în al doilea, datele de ieșire din primul studiu (valorile câmpului de temperaturi rezultat în regim staționar la pasul 6889 - pasul de începere a sezonului de încălzire), vor fi date de intrare pentru simularea în regim nestaționar. Perioadele investigate de timp fiind foarte lungi, a fost necesară efectuarea mai multor studii în regim nestaționar interconectate între ele, așa cum se detaliază în subcap. 4.3. Varianta dezvoltată la această metodă de inițializare este detaliată în subcap. 4.3.4.

Condițiile inițiale de temperatură, aferente primului pas de timp și simulării în regim staționar sunt:

- temperatura exterioară la 15 Octombrie, ora 1 sau ora 6889 din anul calendaristic curent, înregistrat în baza de date ASHRAE, pentru mun. Cluj-Napoca;

- temperatură interioară de 20°C;
- temperatură constantă sol de 9°C.

În a doua metodă, calculul câmpului inițial de temperaturi se face prin introducerea unei temperaturi inițiale constante, dar aceasta implică ca simularea să aibă o perioadă de pre-simulare de “încălzire”, care să permită stabilizarea valorilor fluxului termic determinate în această etapă, până când se atinge regimul cvasi-staționar. Utilizarea acestei metode nu se justifică ca și consum de timp.

Pentru celelalte două metode menționate nu au fost făcute verificări prealabile pentru modelele numerice din această teză.

4.2.5 Ipoteze de calcul considerate în studiile numerice

Janssen et al. [11] au identificat o diferență de 11% în pierderile de căldură către sol la nivelul unui sezon de încălzire, pentru un model de subsol încălzit, între modelul care utilizează doar conducția termică și un model în care se ține cont de transferul de umiditate și de masă – model bidimensional, în regim nestaționar.

Analizele realizate în această teză nu vizează transferul de umiditate și de masă, ci doar transferul prin conducție, mai multe cercetări în domeniu acceptând preponderența efectului conducției ca și mod principal al transferului de căldură în sol [82], [110], [105].

Modelele tridimensionale studiate în acest capitol în regim nestaționar, propun studii cu pasul de timp ora, iar modelarea respectă următoarele ipoteze:

- Ecuația căldurii este rezolvată iterativ, cu pas de timp maxim de o oră, utilizând metoda elementului finit;
- Temperatura la frontiera modelului nu este temperatura aerului; se ține cont de componenta convectivă și radiativă (transfer termic superficial la suprafață) prin introducerea coeficienților de transfer termic superficial α_i și α_e cu valori constante;
- Conductivitatea termică și capacitatea calorică nu variază în timp, funcție de umiditate, porozitate și efectele înghețului, așadar se utilizează ipoteza omogenității temporale a proprietăților de material;
- Valoarea conductivității termice și a capacității calorice masice nu se modifică în spațiu (ipoteza corpului izotrop).

În vederea optimizării modelării numerice propuse s-au aplicat următoarele tehnici de modelare, astfel:

- Utilizarea simetriilor, în vederea reducerii dimensiunii modelului simulat (a numărului de noduri din rețeaua de discretizare, a numărului de grade de libertate, respectiv a matricii de „rigiditate” și a numărului de ecuații algebrice care se rezolvă în mod iterativ);
- Rezolvarea secvențială a modelului propus. Timpul de analiză pentru obținerea unor rezultate relevante pentru acest studiu fiind îndelungat, s-au efectuat mai multe studii interconectate între ele prin legături de tipul: datele de ieșire (rezultatele) studiului anterior sunt date de intrare pentru studiul următor;
- Utilizarea unor algoritmi cu convergență rapidă, care să utilizeze eficient memoria calculatorului.

4.3 Studiul parametric al transferului de flux termic la plăci pe sol de dimensiuni mari în regim termic nestaționar

4.3.1 Parametrii care influențează rezultatele simulărilor numerice în regim nestaționar

În vederea identificării parametrilor care influențează rezultatele modelărilor numerice, s-a efectuat un test pe un model redus, un masiv de pământ modelat geometric tridimensional, de dimensiuni 5 x 5 x 10 m, cu date de intrare pentru condițiile de contur aferente unui model unidirecțional și care vizează transferul de flux termic unidirecțional. În Tab. 4.7 se face o sinteză a condițiilor de contur utilizate pentru acest model:

Tab. 4.7 Sinteza condiții de contur pentru modelul Test

Zona de impunere condiții	Superior	Inferior	Lateral
Tip condiții	Fourier	Dirichlet	Neumann (caz particular)
Temperatura	Funcția $T_{\text{ext}}(t)$	$T_{\text{sol}} = 9^{\circ}\text{C}$	Adiabatic
Coef. transfer termic superf.	$\alpha_e = 24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	-	Adiabatic

Principali parametri care s-au verificat sunt:

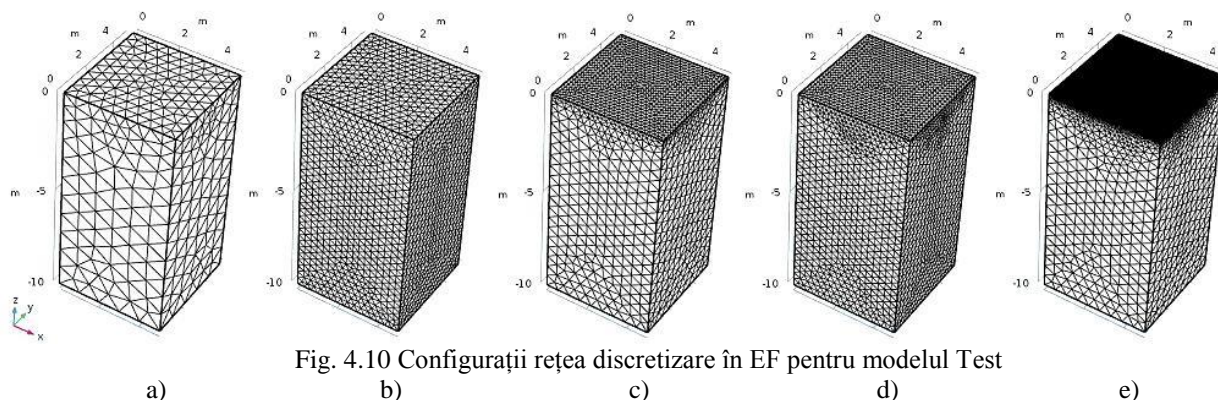
- Rețeaua de discretizare (influența rafinării prin îndesire a acesteia asupra rezultatelor);
- Influența variației subpasului de simulare între două ore consecutive de simulare;
- Tipul de algoritm utilizat (direct sau iterativ), în vederea reducerii timpului computațional și a memoriei RAM utilizate.

Modelul se numește generic, *Test*, analizându-se 8 combinații distincte ale celor trei tipuri de parametri a căror influență este studiată. Detalierea acestora se face în Tab. 4.8:

Tab. 4.8 Parametrii utilizați pentru modelul Test și durata simulării

Model	Discretizare Elem. Finite	Subpas simulare [h]	Tip algoritm rezolvare prin MEF	Durată simulare
Test_A1	Vezi Fig. 4.10 a)	0.1	Direct - PARDISO	42 s
Test_A2	Vezi Fig. 4.10 a)	0.01	Direct - PARDISO	4 min 57 s
Test_B	Vezi Fig. 4.10 b)	1	Direct - PARDISO	18 min 5 s
Test_C1	Vezi Fig. 4.10 b)	0.01	Iterativ GMRES / GMS	45 min 52 s
Test_C2	Vezi Fig. 4.10 c)	0.1	Iterativ GMRES / GMS	1 min 54 s
Test_C3	Vezi Fig. 4.10 d)	0.1	Iterativ GMRES / GMS	N/A
Test_D1	Vezi Fig. 4.10 e)	0.1	Iterativ GMRES / GMS	N/A
Test_D2	Vezi Fig. 4.10 e)	1	Iterativ GMRES / GMS	N/A

Se face precizarea că pentru modelele Test_D1 și Test_D2 pasul de discretizare la suprafața expusă variațiilor orare ale temperaturii exterioare este impus la max. 2.5 cm.



S-a analizat temperatura superficială la suprafața superioară, expusă variației orare a temperaturilor exterioare, în punctul de coordonate $T_{se}(0,0,0)$. Rezultatele (vezi Tab. 4.9) s-au comparat cu rezultatele obținute prin simulare în regim staționar și cu modele analitice pentru condițiile de contur aferente aceluiași pași de timp analizați. Rezultatele obținute în regim staționar sunt identice cu rezultatele obținute utilizând relația (4-56):

$$T_{se} = T_e - \frac{\Delta T}{\alpha_e \cdot R} \quad (4-56)$$

unde:

$T_e = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ – corespunzător orei 6890 din an;

$T_e = 14.8 \text{ }^\circ\text{C}$ – corespunzător orei 6900 din an, conform temperaturilor exterioare anuale orare utilizate.

Tab. 4.9 Temperaturi superficiale exterioare obținute în modelele Test

Pas [h] \ Tse [°C]	Staționar	Test A1	Test A2	Test B	Test C1	Test C2	Test C3	Test D1	Test D2
	Analitic								
6889	9.992	10.457	10.457	10.410	10.410	10.39	10.394	10.370	10.370
6900	14.752	11.281	11.282	11.611	11.613	11.75	11.729	11.885	11.886

Pe baza analizei valorilor numerice a temperaturii superficiale obținute se fac următoarele observații:

- La modificarea dimensiunii rețelei de discretizare, valoarea soluției numerice obținute are tendința să se apropie de rezultatul obținut utilizând formula analitică sau soluția obținută în regim staționar pe pasul de timp, iar valorile sunt cu atât mai apropiate cu cât rețeaua de discretizare este mai fină în zona de interes a modelului. Pentru modelul *Test* zona de interes este zona superioară de contur a modelului, adică suprafața pământului expusă variațiilor orare ale temperaturii;

- Nu se justifică îndesirea numărului de noduri în rețeaua de discretizare în domeniul (volumul) analizat, pentru că nu influențează rezultatele analizate în zona (suprafața) de contur / frontieră a domeniului;
- Influența îndesirii rețelei de discretizare în EF este semnificativă pentru zona (suprafața) studiată;
- Influența variației subpasului între două ore consecutive, de la subpasul de 1 h la un subpas de 0.1 h, este destul de redusă (subpasul impune apelarea algoritmului pentru fiecare oră definită în funcția $T_{ext}(t)$), iar o rafinare secundară a acestuia, de la subpas 0.1 h la subpas 0.01 h, prezintă o influență ne semnificativă asupra rezultatelor obținute;
- Programul utilizat are o gamă largă de algoritmi pentru rezolvarea directă sau iterativă a sistemelor liniare; o parte dintre ele se regăsesc în biblioteci “math-solver” cu posibilitatea introducerii lor și în alte programe care utilizează MEF. De exemplu, solverul direct PARDISO [111], elaborat de Schenk [112], este inclus în biblioteca online de rutine matematice optimizate Intel Math Kernel Library [113].

Primele trei observații efectuate pentru modelul numeric *Test*, permit propunerea unei rețele de discretizare de tipul următor: îndesită pe zona de contur a plăcii pe sol (zona a căror rezultate face obiectul studiilor efectuate în acest capitol) și cu un număr mai mic de noduri analizate în restul domeniului. În acest mod se reduce timpul computațional și memoria alocată, datorită discretizării judicioase în elemente finite.

Variația subpasului cu care s-au făcut simulările este de maxim 1 h, astfel încât să fie apelate toate datele de intrare variabile (temperaturile orare) din condițiile de contur.

Referitor la algoritmi de calcul, s-a observat că dacă pentru un model simplu, cum este *Test*, solvele directe au convergență mai rapidă decât cele iterative, pentru modelul analizat ulterior în acest capitol, în care se introduce și interacțiunea cu clădirea (transferul de flux termic unidimensional devenind transfer de flux termic tridimensional), algoritmi iterativi sunt mai eficienți. Utilizarea unui algoritm corespunzător cu complexitatea modelului analizat și specificul problematicei studiate are ca efect reducerea timpului computațional, criteriu care este foarte important când se intenționează efectuarea de studii care investighează comportamentul în timp pe perioade îndelungate pentru modele geometrice complexe.

O interpretare fizică a rezultatelor numerice este că starea de echilibru termodinamic aferent simulării în regim staționar nu ajunge să fie atins în simulările din regim nestaționar, iar acest aspect se evidențiază în baza a două observații:

- Temperatura superficială de la suprafața terenului, expusă variației orare a temperaturilor exterioare (prin funcția $T_{ext}(t)$), nu ajunge la valoarea din modelarea în regim staționar, însă, cu cât modelarea este mai rafinată, cu atât valoarea temperaturii tinde spre valorile obținute în regim staționar, dar fără a le atinge;
- Temperatura de pe suprafața pământului nu apucă să se distribuie pe toată adâncimea masivului de pământ pe durata unei ore.

4.3.2 Simulare numerică cu pas orar a plăcii de dimensiune 30x30 m pe durata de 8 ani

Studiile întreprinse în regim termic nestaționar vizează determinarea comportamentului specific pentru plăcile pe sol de dimensiuni mari, dimensiuni specifice de regulă halelor industriale sau clădirilor nerezidențiale: mall-uri cu regim de înălțime Parter, clădiri comerciale de retail, clădiri de birouri sau chiar clădiri educaționale.

Pentru placa de dimensiune 30x30 m geometria modelului simulat este descrisă în subcap. 4.2.1, luându-se în considerare inclusiv interacțiunea cu pereții secționați cu limită adiabatică la 1 m de la cota pardoselii.

Considerente computaționale

Analiza vizează studiul transferului de flux termic a plăcii pe sol, pentru 8 ani de simulare, cu pas de timp orar, care include 7 sezoane de încălzire, cu durata fiecărui sezon de încălzire cuprins în intervalul 15 octombrie – 15 aprilie.

Inițializarea modelului se face pentru data de 15 octombrie, ora 1, pasul 6889, cu următoarele temperaturi: $T_i = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_e = 10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{sol}} = 9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Rețeaua de discretizare în elemente finite s-a propus de dimensiuni variabile, utilizând elemente finite de tip tetraedre, cu o rețea foarte fină pentru placă și pereți, fină pentru o zonă de 5 m lângă clădire și 2 m adâncime în sol în jurul clădirii, fină pentru suprafața solului, iar în zonele îndepărtate de zona de interes s-au definit elemente finite de dimensiuni mai mari, conform concluziilor obținute în subcap. 4.3.1, rețeaua de discretizare fiind definită conform Fig. 4.11.

Criteriul principal care s-a utilizat în alegerea rețelei de discretizare a fost *stabilitatea soluției numerice*, astfel că rețeaua s-a rafinat până când soluția numerică a devenit independentă de discretizarea rețelei.

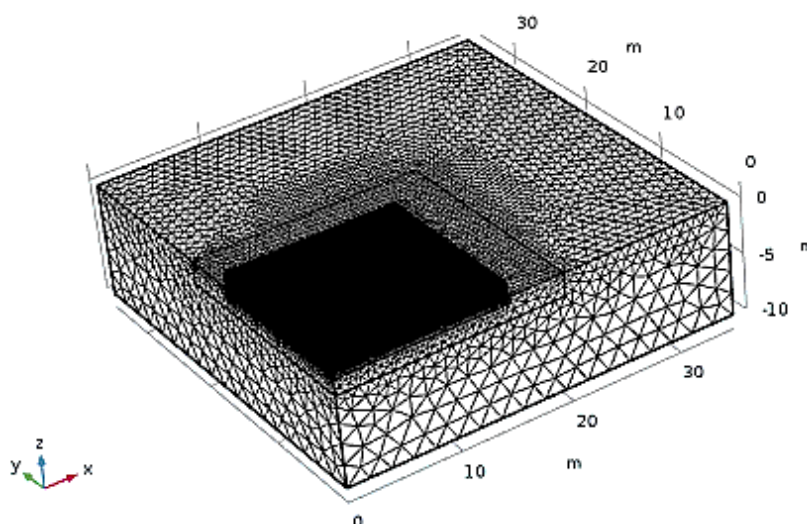


Fig. 4.11 Discretizarea în elemente finite a modelului cu placă 30x30m

Pasul de timp maxim a fost impus la 1 oră și corespunde variației temperaturilor exterioare orare. Pentru obținerea soluțiilor numerice a câmpului de temperaturi din modelul geometric tridimensional a fost utilizat un algoritm de rezolvare a sistemelor de ecuații liniare, bazat pe metoda generalizată a reziduurilor minime (GMRES), metodă iterativă dezvoltată de Saad & Schultz [114], recunoscută ca și metodă în care convergența este atinsă rapid utilizând eficient memoria calculatorului pentru ecuații de tip eliptic și parabolic, așa cum este ecuația (4-7), respectiv ecuația (4-8).

În sistemul liniar matriceal de tip $A \cdot x = b$, care se rezolvă numeric în mod iterativ, pentru a reduce numărul termenilor necunoscuți din matricea A , s-a efectuat preconditionarea pe stânga a sistemului prin utilizarea unui alt algoritm iterativ bazat pe metoda Gauss-Seidel. Astfel, în etapa de preconditionare sistemul a fost rezolvat iterativ sub forma:

$$x_i = x_{i-1} + M^{-1} \cdot (b - A \cdot x_{i-1}).$$

Dacă matricea M se consideră diagonală matricii A , pentru rezolvarea iterativă se utilizează metoda lui Jacobi; dacă M este matricea triunghiulară inferioară se utilizează metoda Gauss-Seidel, iar dacă pentru îmbunătățirea ratei de convergență a metodei Gauss-Seidel se introduce un factor de relaxare ω , se obține metoda relaxării succesive SOR [115]. Pentru modelele numerice analizate s-a utilizat metoda SOR cu un factor de relaxare de $\omega = 1$, valoare a lui ω pentru care însă, de fapt, se ajunge tot la metoda Gauss-Seidel pentru etapa de preconditionare a sistemului.

Până s-a ajuns la această combinație de algoritmi de preconditionare și de rezolvare a ecuațiilor diferențiale specifice problematicii studiate s-au încercat simulări cu mai multe variante de algoritmi cunoscuți în literatura de specialitate: algoritmi direcți (PARDISO, MUMPS, SPOOLES) și iterativi (Algebraic Multigrid Solver/Preconditionare: Geometric Multigrid Solver (GMS); Algoritmul Gradientilor Conjugați (CGI)/Preconditionare: GMS; Algoritmul Gradientilor Biconjugați Stabilizați (BiCGStab)/Preconditionare: GMS; Algoritmul Metodei Generalizate a Reziduurilor Minime (GMRES)/Preconditionare: GMS; Algoritmul GMRES/Preconditionare: Jacobi; Algoritmul CGI/Preconditionare: SSOR; Algoritmul BiCGStab/Preconditionare: SOR).

Pentru toți acești algoritmi s-a efectuat o analiză similară cu cea făcută pentru modelul generic *Test* în subcap. 4.3.1, principalii parametri analizați fiind: timpul necesar pentru simulare, memoria RAM ocupată și valorile temperaturilor superficiale pe suprafața interioară a plăcii raportat la soluția numerică obținută în regim staționar. S-a urmărit identificarea algoritmilor care să asigure soluții numerice pentru temperaturile superficiale interioare cât mai apropiate de soluția obținută în regim staționar, timp redus necesar simulării și cu o memorie de stocare cât mai redusă - în această ordine a importanței - și s-au identificat sub forma algoritmilor iterativi: algoritmul bazat pe metoda generalizată a reziduurilor minime (GMRES), cu preconditionare utilizând algoritmul SOR bazat pe metoda Gauss-Seidel.

Calculatorul pe care s-au efectuat toate analizele numerice din acest capitol are următoarele caracteristici: procesor Intel Core i7 950 2.66 GHz cu 8 GB memorie RAM. Pentru acest studiu au fost necesare 28 zile de simulare, iar acest model ocupă în total: 2.4 TB de memorie.

Fiind necesare volume foarte mari de memorie a calculatorului atât la rulare, cât și la stocare, pe principiul "divide et impera", analiza în regim nestaționar a fost împărțită în 33 studii distincte, cu durată de timp investigată variabilă la nivel de studiu. Câteva studii de durată

scurtă (de 24 h) au fost necesare, pentru a putea transfera câmpul de temperaturi de la un studiu la celălalt, având în vedere memoria de stocare semnificativă necesară atât pe durata simulării, cât și ulterior efectuării simulării la salvarea modelului. De asemenea, temperatura exterioară corespunzătoare orei 1 din anul curent, a fost introdusă și pentru ora 8761 din an. În acest mod, este asigurată continuitatea datelor de intrare de tip temperaturi exterioare pentru mai mulți ani de simulare consecutivi. Astfel, studiile au fost împărțite în:

- Regim staționar: Studiu 1 – Pas 6889;
- Regim nestaționar: conform Tab. 4.10.

Tab. 4.10 Intervale orare ale studiilor numerice intermediare pentru placa 30x30m

Nr. studiu	Anul	Pas inițial (ora)	Pas final (ora)	Nr. studiu	Anul	Pas inițial (ora)	Pas final (ora)
Studiu 2	1	6889	8761	Studiu 18	5	2520	4345
Studiu 3	2	1	4345	Studiu 19	5	4345	4369
Studiu 4	2	4345	6889	Studiu 20	5	4369	6889
Studiu 5	2	6889	6913	Studiu 21	5	6889	6913
Studiu 6	2	6913	8761	Studiu 22	5	6913	8761
Studiu 7	3	1	4345	Studiu 23	6	1	2520
Studiu 8	3	4345	6889	Studiu 24	6	2520	2544
Studiu 9	3	6889	6913	Studiu 25	6	2544	6889
Studiu 10	3	6913	8761	Studiu 26	6	6889	6913
Studiu 11	4	1	4345	Studiu 27	6	6913	8761
Studiu 12	4	4345	4369	Studiu 28	7	1	2520
Studiu 13	4	4369	6889	Studiu 29	7	2520	2544
Studiu 14	4	6889	6913	Studiu 30	7	2544	6889
Studiu 15	4	6913	8761	Studiu 31	7	6889	6913
Studiu 16	5	1	24	Studiu 32	7	6913	8761
Studiu 17	5	24	2520	Studiu 33	8	1	2520

Postprocesarea datelor de ieșire s-a făcut pentru fiecare model simulat extragându-se date de tipul: flux termic orar integrat la nivelul plăcii pe sol și profile de temperaturi în mai multe secțiuni la începutul și la mijlocul lunii, pentru Sezonul 4 de încălzire, respectiv pentru Anul 4 analizat (perioadele pentru care sunt interpretate rezultatele sunt alese după ce regimul cvasi-staționar a fost atins). Pentru lunile de 30 și 31 zile, rezultatele extrase corespund zilei a 15-a din lună, ora 1. Pentru luna de 28 zile, rezultatele corespund zilei a 14-a din lună, ora 1.

Astfel, rezultatele numerice obținute sunt reprezentate, prin postprocesare, sub forma de grafice, în secțiunile indicate în Fig. 4.12, în coordonatele carteziane descrise în Tab. 4.2.

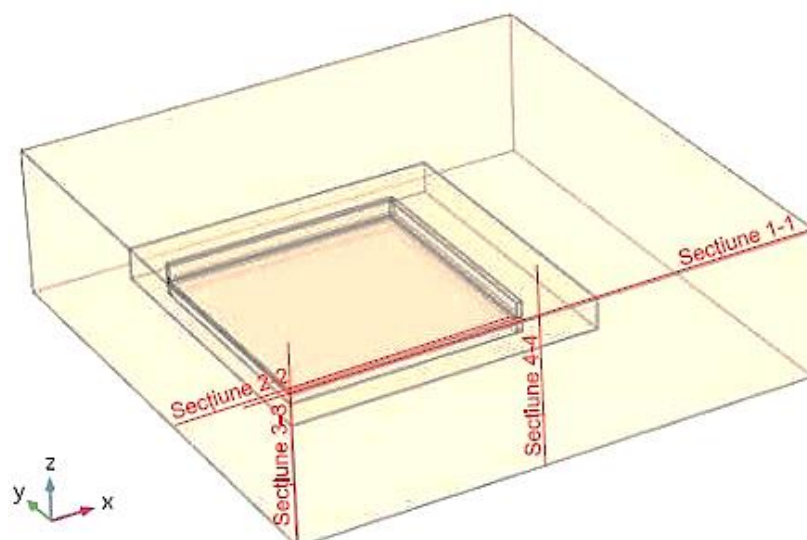


Fig. 4.12 Amplasarea secțiunilor în modelul geometric pentru analiza rezultatelor numerice

Tab. 4.11 Coordonatele carteziene ale secțiunilor pentru modelul 30x30 m scara 1:1

Coordonate carteziene		x	y	z
Secțiune 1-1	Punct 1	0.00	0.05	0.00
	Punct 2	20	0.05	0.00
Secțiune 2-2	Punct 1	0.00	0.05	-10.00
	Punct 2	14.66	0.05	0.35
Secțiune 3-3	Punct 1	0.00	0.00	0.35
	Punct 2	0.00	0.00	-10.00
Secțiune 4-4	Punct 1	16.00	0.00	0.00
	Punct 2	16.00	0.00	-10.00

Pentru Secțiunea 1-1 rezultatele pe durata sezonului de încălzire 4 sunt expuse în Fig. 4.13. Se observă o influență relativ mare a variației temperaturilor exterioare pe suprafața pardoselii interioare, până la o distanță de cca. 2 m de la fața peretelui, respectiv o influență mai redusă pe următorii 2 m, în total pe mai mult din 10% din lungimea peretelui de 30 m.

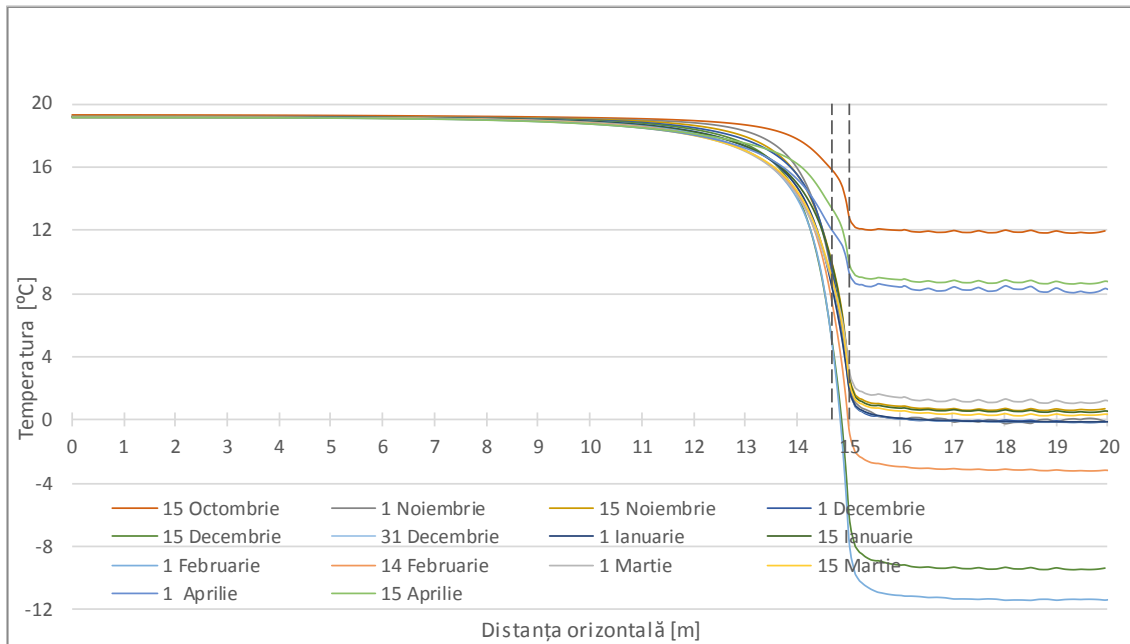


Fig. 4.13 Variația temperaturii în sol în Secțiunea orizontală 1-1, în Sezonul 4 de încălzire

În Fig. 4.14 este prezentată variația distribuției temperaturii superficiale pe placa pe sol, în Sezonul 4 de încălzire. Pentru valorile aferente datei de 15 noiembrie (Pasul 7633) și 15 decembrie (Pasul 8353) s-au observat fluctuații în distribuția temperaturii superficiale în proximitatea peretelui, așa cum se văd în detaliu.

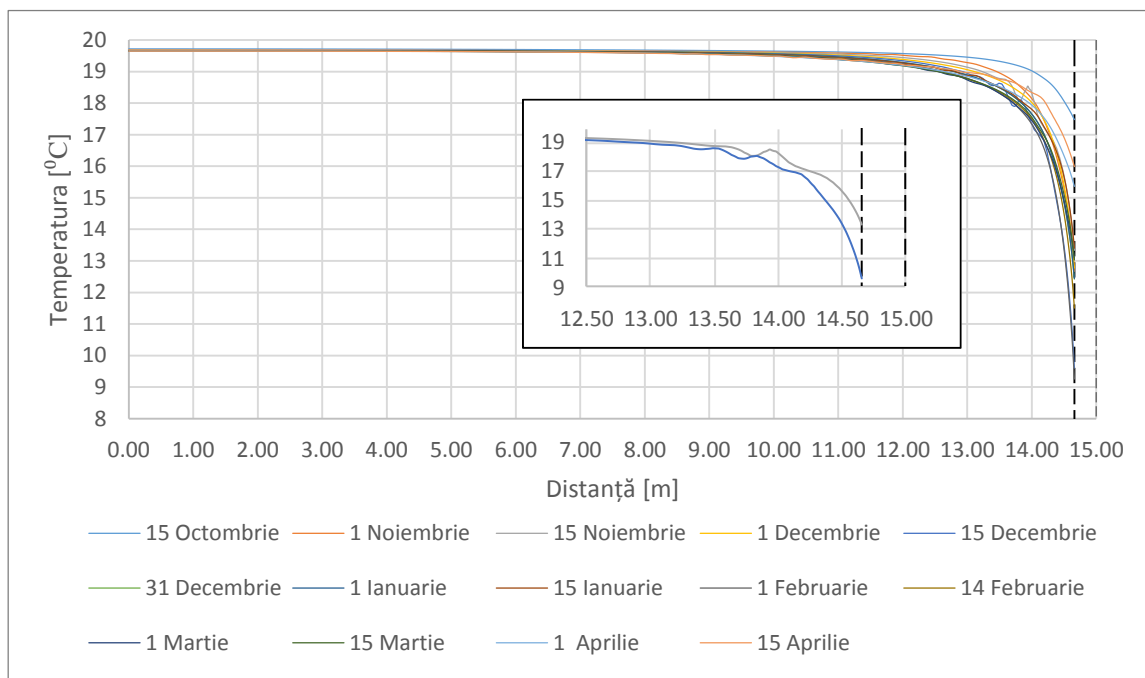


Fig. 4.14 Variația distribuției temperaturii superficiale pe placa pe sol în Secțiunea 2-2, în Sezonul 4 de încălzire

Pentru determinarea cauzei acestor fluctuații s-a analizat variația temperaturii exterioare în orele aferente zilelor de dinaintea acestor pași de timp, redată în Fig. 4.15 pentru pașii de timp analizați (orele) din luna noiembrie, respectiv pentru pașii de timp din luna decembrie. Se poate remarca că variațiile bruște ale temperaturii exterioare orare (bruște, raportat la media variațiilor de la o oră la alta în intervalul de timp analizat, deci *variații*

relative) ajung să influențeze suprafața plăcii după cca. două zile (după 58 h pentru analiza din luna Noiembrie, respectiv după 53 h pentru analiza din luna Decembrie). Cu cât variația bruscă este mai mare, cu atât efectul asupra temperaturii superficiale este mai mare (fluctuația temperaturii superficiale este mai mare), așa cum se vede și în detaliul din Fig. 4.14.

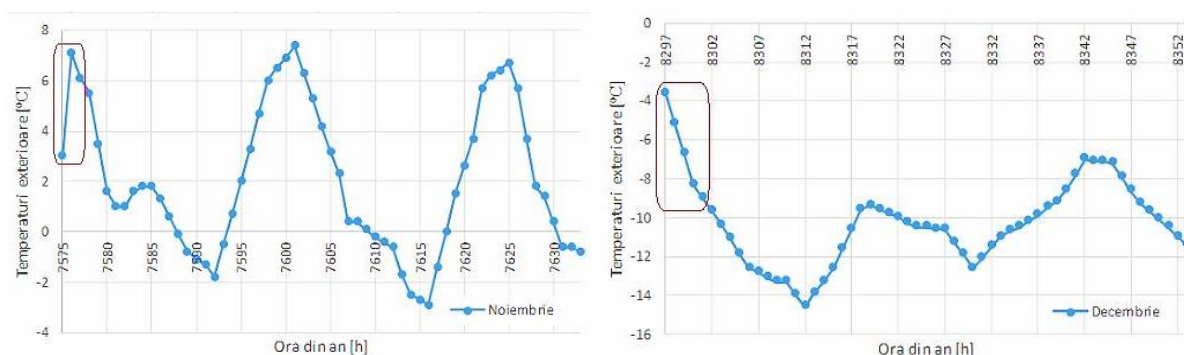


Fig. 4.15 Temperaturi exterioare orare loc. Cluj-Napoca pe intervale de timp a) în luna Noiembrie (12 nov. ora 13 – 15 nov. ora 1) b) în luna Decembrie (12 dec. ora 17 - 15 dec. ora 1)

Fig. 4.16 reprezintă variațiile verticale ale temperaturii în sol sub mijlocul plăcii, iar Fig. 4.18 prezintă variațiile verticale ale temperaturii în sol pornind dintr-un punct arbitrar ales din exteriorul clădirii. Se remarcă influența pe o adâncime redusă a variației temperaturilor interioare pe placă pe durata verii (vezi detaliu, Fig. 4.16), când această analiză este posibil de efectuat având în vedere condițiile de interior propuse. Aceasta permite enunțarea ideii că betonul din placa pe sol înmagazinează căldura înainte de a o transmite mai departe în solul deja încălzit din sezoanele de iarnă. Această observație a dus la efectuarea unui alt studiu, și anume: oprirea încălzirii pe durata unui an calendaristic începând cu sfârșitul sezonului 3 de încălzire, cu scopul a determina ce se întâmplă cu căldura înmagazinată sub suprafața centrală a plăcii de la un an la altul. Acest studiu este detaliat în subcap. 4.4.

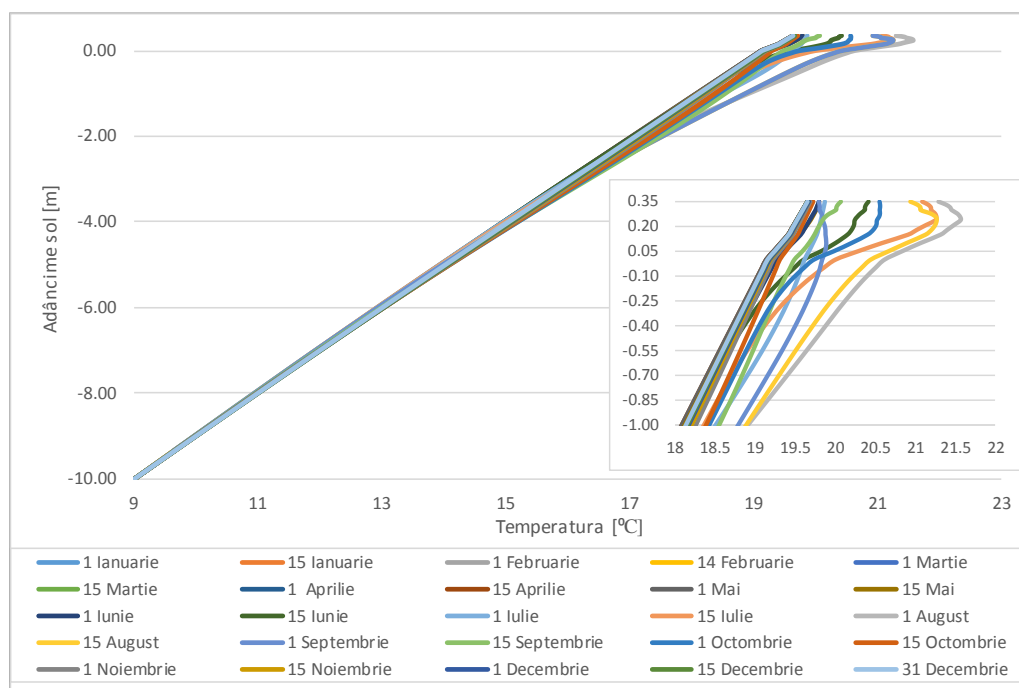


Fig. 4.16 Variația temperaturii în sol în Secțiunea verticală 3-3 în Anul 4

În Fig. 4.17 se prezintă variația temperaturii în Secțiunea 3-3 pentru Pasul 1 de timp, aferent datei de 1 ianuarie, ora 1, de la anul 2 la anul 6, adică primele 5 sezoane de încălzire. Se remarcă că pentru același profil de temperatură, în aceeași zi și oră a anului temperaturile cresc de la primul sezon de încălzire până la atingerea regimului cvasi-staționar, ceea ce în mod analog duce la o reducere a fluxului termic transferat între clădire și sol în primii ani de utilizare a clădirii. Totuși, pentru că aceste rezultate să nu inducă în eroare s-au mai făcut o serie de investigații suplimentare în subcap. 4.3.4, subcap. 4.3.5 și subcap. 4.4.

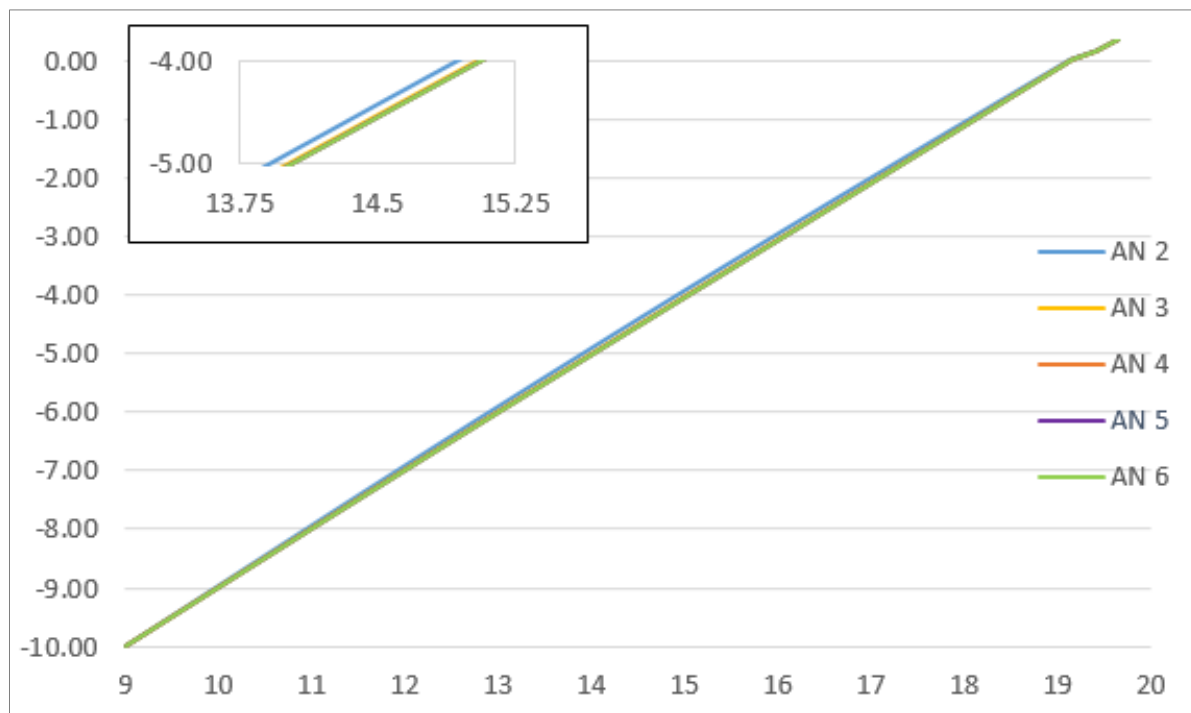


Fig. 4.17 Variația orară a temperaturilor în Secțiunea 3-3 în 1 ian. ora 1, din anul 2 până în anul 6

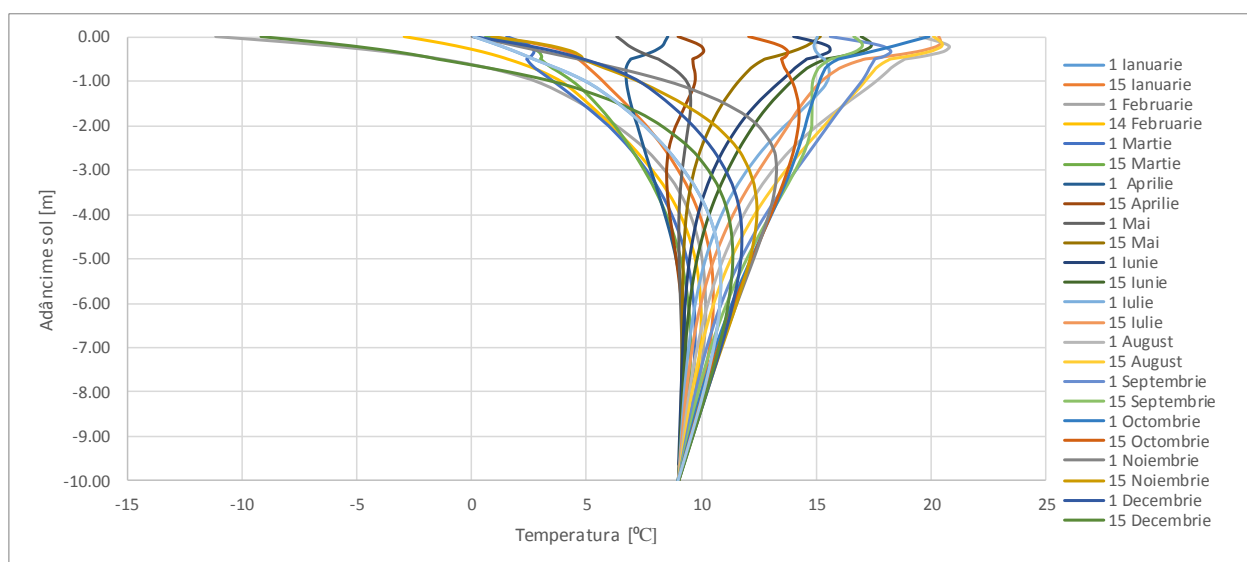


Fig. 4.18 Variația temperaturii în sol în Secțiunea verticală 4-4 în Anul 4

Pentru adâncimi alese arbitrar se prezintă variația temperaturilor în sol pe durata unui an calendaristic (anul 4), pentru Secțiunea 3-3 și Secțiunea 4-4.

Referitor la Fig. 4.19 se remarcă o adâncime de cca. 1.50 m sub cota terenului sistematizat pentru care variația temperaturii interioare, corespunzătoare funcției $T_{int}(t)$, prezintă o influență asupra distribuției de temperaturi în sol, pe durata sezonului de vară (vezi Fig. 4.8).

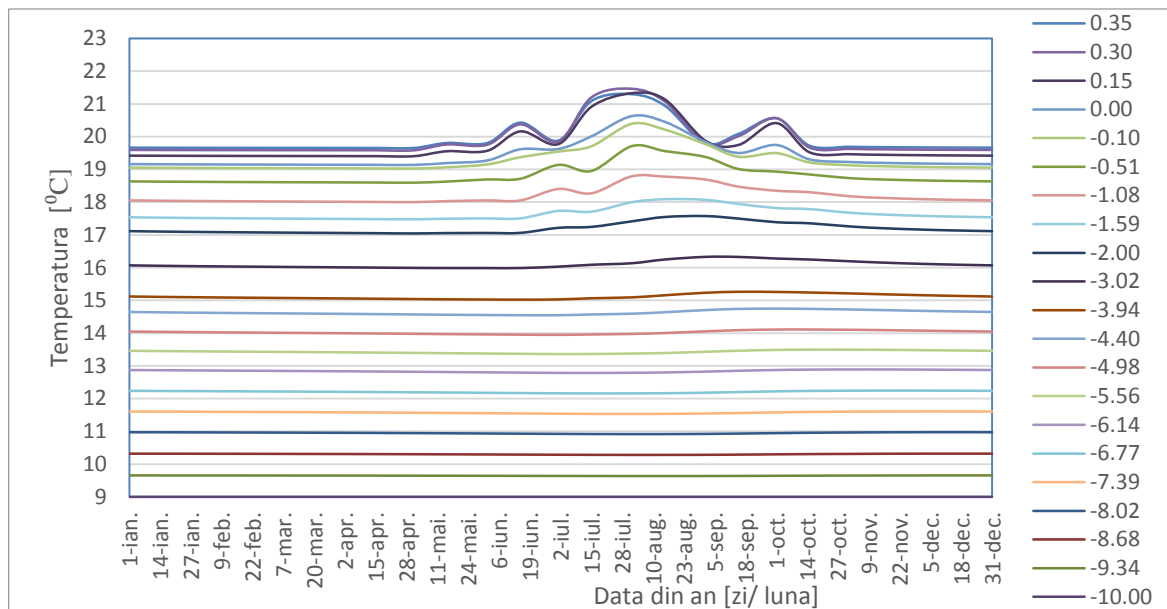


Fig. 4.19 Variația amplitudinii temperaturii pe placă și în sol cu adâncimea în Secțiunea 3-3 pe durata Anului 4

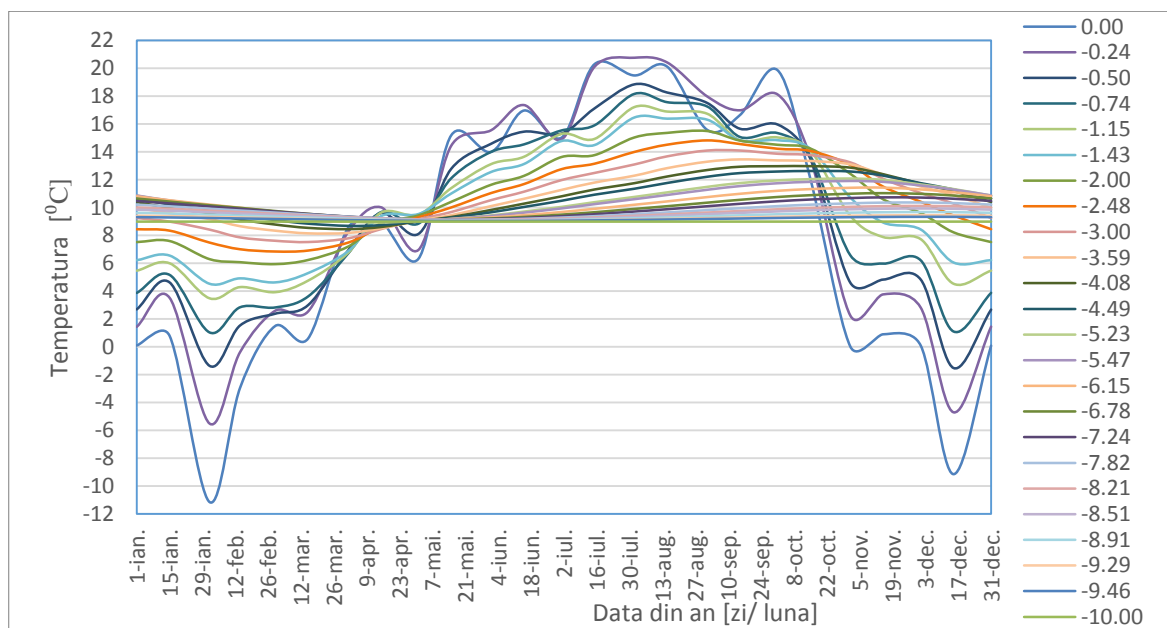


Fig. 4.20 Variația amplitudinii temperaturii în sol cu adâncimea în Secțiunea 4-4 pe durata Anului 4

Referitor la Fig. 4.20 se remarcă fenomenul de descreștere al amplitudinii temperaturii exterioare, respectiv de creștere al defazajului odată cu creșterea adâncimii, aspect semnalat de mai mulți autori printre care Hillel [82] și Bălan et al. [83].

4.3.3 Propunerea unui model simil pentru modele numerice

Pe baza criteriilor de similitudine enunțate în subcap. 4.1.3 s-au efectuat mai multe încercări de determinare a unui model simil care să răspundă problemei analizate în această teză: transferul de flux termic la plăci pe sol de dimensiuni mari, pe durate lungi de timp, pentru modele tridimensionale.

Pentru raportul r s-au încercat mai multe variante de “comprimare” a timpului cu valori ale lui $r = 365, 730$. Varianta de “comprimare” a timpului a fost încercată și de Petcu [94] într-o aplicație de transfer termic dinamic printr-o metodă analitică pentru $r = 365$, cu rezultate bune.

Raportul $r = 730$, arată că pentru 30.42 zile (730 h) aferente duratei reale (care reprezintă o lună “echivalentă” a anului, cu o dimensiune constantă a fiecărei luni din an), în simulare se introduce un timp comprimat de 1 oră, astfel că pentru simularea aferentă unui an s-au introdus 12 valori de temperatură exterioară, ca medie a temperaturilor orare înregistrate a celor 730 h aferente lunii “echivalente”. În mod similar s-au calculat temperaturile medii pentru lunile aferente sezonului de vară pentru interiorul clădirii, pe durata sezonului de încălzire valoarea temperaturii fiind constantă, atât în modelul simil, cât și în modelul real.

La o astfel de abordare a modelelor simil, cea mai mare provocare este însă temperatura utilizată pentru inițializarea modelului numeric în simularea în regim staționar. Și pentru aceasta s-au studiat următoarele variante:

- Media temperaturilor exterioare de dinaintea și de după pasul de timp ales pentru simularea în regim staționar;
- Temperatura exterioară utilizată în modelul real, aferentă pasului de timp care marchează începutul sezonului de încălzire $Pas = 6889$, $T_e = 10.6$ °C.

Cu niciuna dintre aceste variante încercate, rezultatele modelului simil nu au fost satisfăcătoare în sensul de corelare riguroasă și interpretare facilă raportat la modelul de referință “real” și, în final, s-a propus păstrarea unui raport $r = 1$.

În ceea ce privește dimensiunile geometrice și proprietățile de material, pentru transformarea modelului real în model simil se utilizează relațiile (4-37) și (4-38) din subcap. 4.1.3.

Ca și alt element specific al modelului simil dezvoltat în această teză, se propune introducerea unui coeficient unic, notat cu m , ales convenabil pentru construirea propriu-zisă a modelului simil, respectiv pentru interpretarea ulterioară a rezultatelor.

$$l_S = m \cdot l_R \quad (4-57)$$

$$\lambda_S = m \cdot \lambda_R \quad (4-58)$$

Înlocuind relația (4-59), în relația (4-37), respectiv relația (4-58) în relația (4-38) și ținând cont de raportul propus $r = 1$, se ajunge la relația (4-59), observându-se directă proporționalitate între dimensiuni și conductivitatea termică, respectiv inversa

proporționalitate între densitate/capacitatea calorică masică, la care se ajunge între proprietățile modelului simil și a modelului real.

$$(\rho \cdot c)_S = \frac{(\rho \cdot c)_R}{m} \quad (4-59)$$

Pentru simulările ulterioare valoarea lui m s-a ales convenabil la valoarea de 0.1, geometria reducându-se utilizând scara de 1:10, iar restul parametrilor fiind determinați în funcție de această alegere. Practic, se scalează modelul geometric prin micșorarea lui de 10 ori, cu corelarea celorlalți parametri care influențează procesul analizat, astfel că același proces de transfer termic în regim nestaționar este efectuat la o scară mult mai mică (vezi Fig. 4.21).

Se consideră impunerea scării de reducere a geometriei, ca și element de influență în interpretarea ulterioară a rezultatelor.

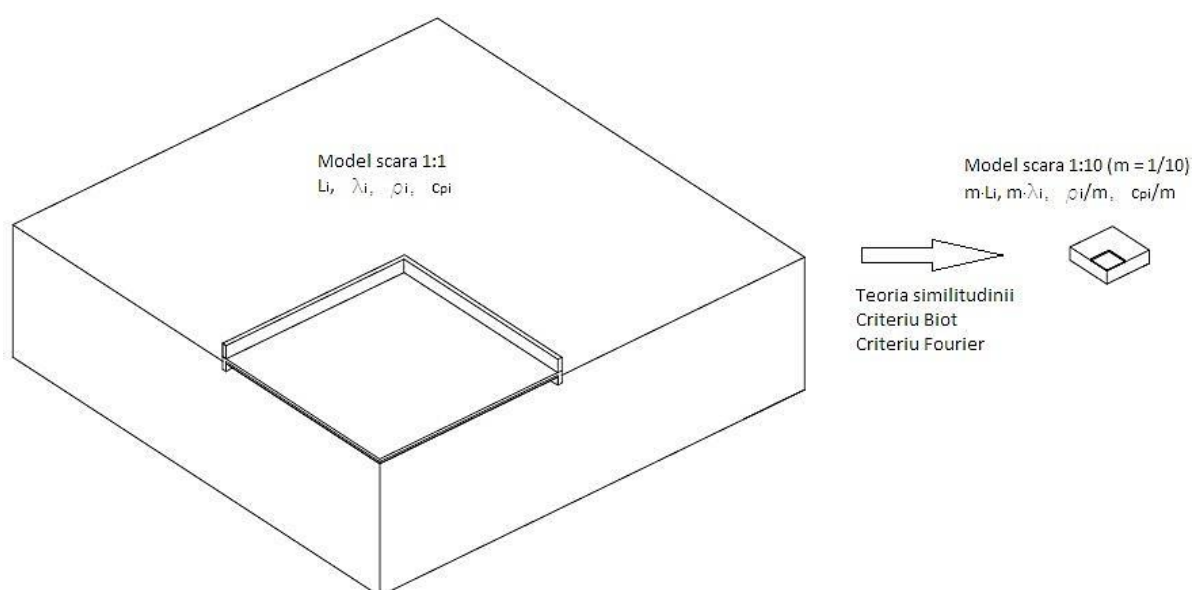


Fig. 4.21 Transformarea modelului real, sc. 1:1, în model simil, sc. 1:10

Valorile pentru parametrii recalculați conform modelului simil propus, pentru introducerea în analiza numerică sunt detaliate în tabelele Tab. 4.12 și Tab. 4.13.

Tab. 4.12 Dimensiuni geometrice model simil scara 1:10

Tip element constructiv	Dimensiuni model simil scara 1:10	
	Lungime Grosime [m]	Înălțime Adâncime [m]
Perete zidărie cărămidă (dim. față de cota superioară pardoseală)	0.034	0.10
Colț placă din beton armat (dim. exterioară)	1.50	0.020
Umplutură sol	1.432	0.015
Masiv de pământ (măsurat de la fața exterioară a peretelui)	2.00	1.00

Tab. 4.13 Caracteristici termotehnice model simil scara 1:10

Caracteristici termotehnice sol	Unitate de măsură	Valoare model simil			
		Masivul de pământ	Umplutură sol	Placă din beton armat	Perete zidărie cărămidă
Conductivitate termică, λ	W/(m·K)	0.2	0.116	0.174	0.8095
Capacitate calorică volumică, $\rho \cdot c_p$	J/(m ³ ·K)	$1.998 \cdot 10^7$	$1.512 \cdot 10^7$	$2.1 \cdot 10^7$	$1.512 \cdot 10^7$

Un alt model simil, cu coeficientul $m = 0.05$ (scalare geometrică 1:20) a mai fost încercat, însă, pentru ca rezultatele simulării să rămână stabile independent de rețeaua de discretizare, aceasta trebuia îndesită semnificativ, în final timpul de calcul necesar pentru efectuarea simulării fiind relativ apropiat de cel de la modelul 1:10 (pentru modelul scalat 1:20 timpul de rulare a fost de 11 h 22 min, iar pentru modelul scalat 1:10 timpul de rulare a fost de 13 h, pentru 5 ani investigați cu pas orar); la acest model s-a renunțat. Este de precizat că rezultatele obținute sunt similare cu modelul de referință, respectiv cu modelul simil scara 1:10 și sunt ușor de interpretat. Pentru un set de rezultate alese arbitrar, acestea sunt prezentate în Tab. 4.14 și se poate observa că eroarea între valorile fluxului termic este sub 0.3% (< 1%).

Extrapolarea valorilor fluxului termic orar de la modelele simil analizate la modelul de referință (sc. 1:1) se poate exprima prin relația (4-60).

$$\Phi_R = \frac{1}{m^2} \cdot \Phi_S \quad (4-60)$$

În Tab. 4.14 s-a determinat eroarea de calcul pentru rezultatele valorilor extrapolate ale fluxului termic pentru modelele simil scalate 1:10, 1:20 și valorile fluxului termic orar pe placă (colțul bisimetric analizat) ale modelului de referință (scara 1:1), la pași de timp aleși în mod arbitrar (anul 2, ziua 1 ianuarie, între orele 1-10).

Tab. 4.14 Determinarea erorii de calcul între rezultate modele simil scalate 1:10, 1:20 și modelul de referință

AN 2	Verif eroare val. flux termic Model simil 1:10 față de model de referință 1:1				Verif eroare val. flux termic Model 1:20 față de model real (de referință)			
Pas timp	Flux termic Φ_R	Flux termic Φ_{Splaca}	Diferență $(\Phi_R - \Phi_{Splaca})$	Err. [%]	Flux termic Φ_R	Flux termic Φ_{Splaca}	Diferență $(\Phi_R - \Phi_{Splaca})$	Err. [%]
[h]	[W]	[W]	[W]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
1	13.1658	1316.58	3.08	0.23	3.2913	1316.54	3.13	0.24
2	13.1634	1316.34	2.69	0.20	3.2907	1316.29	2.74	0.21
3	13.1616	1316.16	2.33	0.18	3.2903	1316.11	2.38	0.18
4	13.1602	1316.02	2.38	0.18	3.2899	1315.98	2.42	0.18
5	13.1592	1315.92	2.34	0.18	3.2897	1315.87	2.39	0.18
6	13.1582	1315.82	2.29	0.17	3.2894	1315.78	2.34	0.18
7	13.1573	1315.73	2.24	0.17	3.2892	1315.68	2.29	0.17
8	13.1562	1315.62	2.21	0.17	3.2889	1315.57	2.26	0.17
9	13.1550	1315.50	2.19	0.17	3.2886	1315.45	2.24	0.17
10	13.1536	1315.36	2.20	0.17	3.2883	1315.31	2.24	0.17

Tot pentru validarea modelului simil propus, s-a făcut o analiză a câmpului de temperaturi în sol pentru două secțiuni verticale, pentru modelul numeric scara 1:1, respectiv pentru modelul numeric simil scara 1:10, pentru pași de timp aleși în mod arbitrar. Rezultatele sunt prezentate în Tab. 4.16.

Pentru Secțiunea 3'-3' și Secțiunea 4-4, a căror coordonate carteziene sunt indicate în Tab. 4.15, s-a analizat câmpul de temperatură pentru următorii pași orari de timp (numerotare ore pe durata An_j , de la 1 la 8760 h):

- AN 1: Studiu în regim staționar, Pas 6889;
- AN 2: 1 Ianuarie ora 1, Pas 1;
- AN 3: 1 Februarie ora 1, Pas 745;
- AN 4: 15 Aprilie ora 24, Pas 2520.

Tab. 4.15 Coordonatele carteziene ale secțiunilor în modelul de referință sc. 1:1 vs. modelul simil sc.1:10

Coordonate carteziene		x		y		z	
		Real	Simil 1:10	Real	Simil 1:10	Real	Simil 1:10
Secțiune 1-1	Punct 1	0.00	0.000	0.05	0.005	0.00	0.000
	Punct 2	20.00	2.000	0.05	0.005	0.00	0.000
Secțiune 2-2	Punct 1	0.00	0.000	0.05	0.005	-10.00	-1.000
	Punct 2	14.66	1.466	0.05	0.005	0.35	0.035
Secțiune 3-3	Punct 1	0.00	0.000	0.00	0.000	0.35	0.035
	Punct 2	0.00	0.000	0.00	0.000	-10.00	-1.000
Secțiune 3'-3'	Punct 1	0.05	0.005	0.05	0.005	0.35	0.035
	Punct 2	0.05	0.005	0.05	0.005	-10.00	-1.000
Secțiune 4-4	Punct 1	16.00	1.600	0.00	0.000	0.00	0.000
	Punct 2	16.00	1.600	0.00	0.000	-10.00	-1.000

Tab. 4.16 Rezultate comparative pentru câmpul de temperaturi model de referință sc. 1:1 vs. simil sc. 1:10

An	Pas de timp	Secțiunea 3'-3'				Secțiunea 4-4			
		Coord . pe axa z	Temperatura [°C]		ΔT	Coord . pe axa z	Temperatura [°C]		ΔT
			Real	Simil			Real	Simil	
[-]	[h]	[m]		[°C]	[m]		[°C]		
1	6889	0.35	19.64458	19.64455	0.00003	0.00	10.70548	10.70627	-0.00078
1	6889	0.15	19.39936	19.39945	-0.00009	-0.99	11.68336	11.68092	0.00244
1	6889	-0.68	18.40009	18.39978	0.00031	-2.00	11.94620	11.94751	-0.00131
1	6889	-6.82	12.09175	12.09230	-0.00054	-6.15	10.74012	10.74407	-0.00395
1	6889	-9.90	9.09703	9.09682	0.00021	-9.64	9.16493	9.16460	0.00033
2	1	0.35	19.64453	19.64455	-0.00001	0.00	0.07244	0.01560	0.05684

An	Pas de timp	Secțiunea 3'-3'				Secțiunea 4-4			
		Coord . pe axa z	Temperatura [°C]		ΔT	Coord . pe axa z	Temperatura [°C]		ΔT
2	1	0.15	19.39942	19.39944	-0.00002	-0.99	4.64322	4.65165	-0.00843
2	1	-0.60	18.48508	18.48513	-0.00005	-2.00	7.02669	7.02776	-0.00108
2	1	-2.00	17.00481	17.00490	-0.00009	-6.15	10.23263	10.24737	-0.01474
2	1	-9.90	9.09703	9.09682	0.00021	-9.64	9.14948	9.15221	-0.00273
3	745	0.35	19.65400	19.65390	0.00010	0.00	-10.90327	-10.84123	-0.06203
3	745	0.15	19.41538	19.41521	0.00017	0.99	2.70360	2.71952	-0.01591
3	745	-0.60	18.52437	18.52396	0.00041	-2.00	6.27813	6.28037	-0.00224
3	745	-2.00	17.07441	17.07369	0.00072	-6.15	10.18857	10.20048	-0.01191
3	745	-9.90	9.09919	9.09895	0.00023	-9.64	9.16378	9.16797	-0.00419
4	2520	0.35	19.65035	19.65030	0.00004	0.00	8.52409	8.41129	0.11280
4	2520	0.15	19.40923	19.40915	0.00007	-0.99	9.64410	9.66087	-0.01676
4	2520	-0.68	18.42566	18.42511	0.00056	-2.00	8.94782	8.95905	-0.01124
4	2520	-6.82	12.14033	12.14044	-0.00011	-6.15	9.12592	9.13025	-0.00433
4	2520	-9.90	9.09884	9.09869	0.00015	9.64	9.05219	9.05425	-0.00205

Conform rezultatelor din Tab. 4.16 se observă că diferența maximă între temperaturile dintre modelul real și modelul simil propus, pentru punctele de coordonate descrise în Tab. 4.15 și Tab. 4.16 aferente Secțiunii 4-4, respectiv pentru echivalentele lor din modelul simil este de sub 0.1 °C, iar în Secțiunea 3'-3', unde rețeaua de discretizare este îndesită (placa pe sol fiind zona studiată în acest model numeric, de fapt), diferența între temperaturi este << 0.005 °C.

Un alt tip de verificare a corespondenței între modele s-a efectuat prin însumarea valorilor fluxurilor termice orare transferate prin placa pe sol pe durata a cinci sezoane de încălzire pentru ambele modele, real și simil, aferente colțului bisimetric al plăcii de dimensiune 30x30 m. Rezultatele sunt prezentate în tabelele Tab. 4.17 și Tab. 4.18.

Tab. 4.17 Variația pierderilor de căldură pe durata a cinci sezoane de încălzire model ColtPlaca 30x30m_Real

Sezonul de încălzire	1	2	3	4	5
Anul	AN1/AN2	AN2/AN3	AN3/AN4	AN4/AN5	AN5/AN6
Pierderi termice (Wh/sezon)	5586756.76	5358040.08	5344450.93	5343205.39	5343218.77
Pierderi termice (kWh/sezon)	5586.76	5358.04	5344.45	5343.21	5343.22
Reducere procentuală față de sezonul 1 [%]	-	4.09	4.34	4.36	4.359

Tab. 4.18 Variația pierderilor de căldură pe durata a cinci sezoane de încălzire model ColtPlaca 30x30m_Simil

Sezonul de încălzire	1	2	3	4	5
Anul	AN1/AN2	AN2/AN3	AN3/AN4	AN4/AN5	AN5/AN6
Pierderi termice (Wh/sezon)	55765.15	53489.25	53353.23	53333.78	53338.04
Pierderi termice (kWh/sezon)	55.77	53.49	53.35	53.33	53.34
Reducere procentuală față de sezonul 1 [%]	-	4.08	4.33	4.36	4.352

Din rezultatele obținute se observă efectul de reducere a fluxului termic față de primul sezon de încălzire pentru același interval de timp analizat, cu procente sensibil egale. Așadar, se constată că efectul inerției termice a solului este surprins și în modelul simil care substituie modelul real.

Sintetic, proprietățile modelului simil dezvoltat în această teză sunt:

- permite scalarea geometrică a modelului la o scară convenabilă;
- prin modelul analitic propus, dependent de factorul geometric, se pot determina valorile fluxului termic integrat pe suprafață aferente modelului real;
- redă câmpul de temperaturi din modelul real;
- respectă proprietățile de inerție termică a solului în timp.

Pentru modelul simil introdus în analiza numerică, numărul de noduri din rețeaua de discretizare este semnificativ redus, permițând efectuarea unor analize tridimensionale de lungă durată la plăci pe sol de dimensiuni foarte mari, sau, prin generalizare, la modele mari de transfer termic a clădirii spre solul care o înconjoară, într-un timp mult mai redus decât dacă s-ar utiliza același model numeric pentru scara 1:1, și a căror rezultate a valorilor de flux termic sunt ușor de extrapolat prin aplicarea modelului analitic (4-60).

Astfel, se poate remarca că implicațiile introducerii teoriei similitudinii în modelările numerice sunt semnificative, aceste proprietăți permițând ca analizele comprehensive ale transferului de flux termic în sol prin metode numerice pe modele tridimensionale să devină mult mai rapide, respectiv cu cerințe computaționale de memorie mult mai reduse, fiind mult mai accesibile pentru cercetători și ingineri, deopotrivă.

Pentru identificarea unor fenomene/aspecte/caracteristici specifice acestui subiect, studiul comprehensiv al transferului de căldură la interacțiunea clădirii cu solul va fi continuat pentru plăci mult mai mari, scalate prin modelul simil propus.

4.3.4 Simulări numerice de lungă durată cu pas orar a plăcii de dimensiune echivalentă 30x30 m prin utilizarea modelului simil. Studiul influenței modului de inițializare al simulării în regim nestaționar

În Fig. 4.22 sunt prezentate rezultate prin aplicarea modelului simil scara 1:10 pe modelul numeric aferent plăcii de dimensiune 30x30 m.

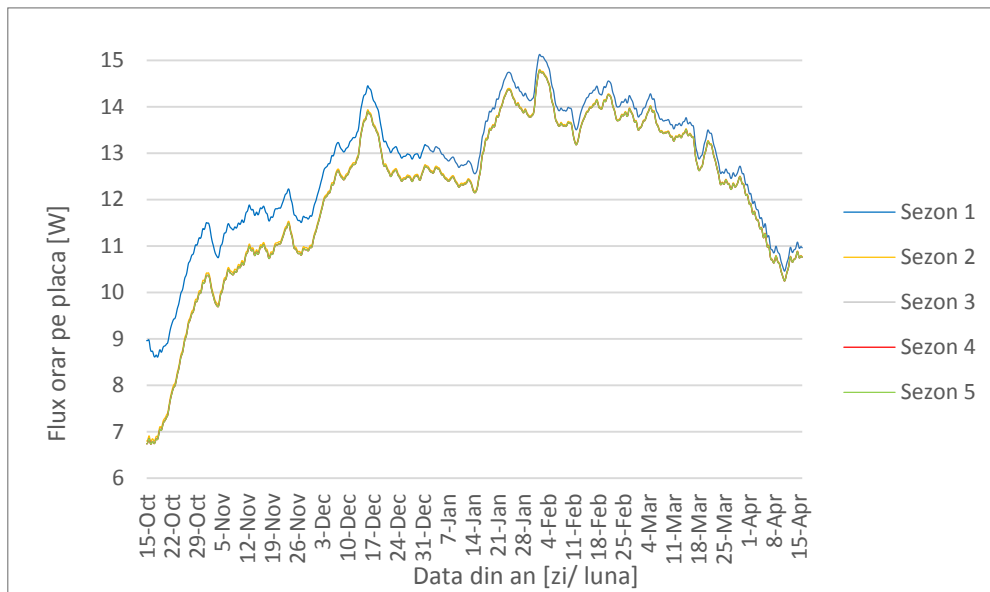


Fig. 4.22 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a cinci sezoane de încălzire pentru ColtPlaca 30x30 m_Simil 1:10

Ca și studiu suplimentar, pe modelul simil pentru placa de dimensiuni 30x30 m s-a efectuat o verificare a impactului modului de inițializare a modelării în regim nestaționar. Astfel, s-a efectuat un studiu în două etape:

- *Etapa 1* - inițializarea s-a efectuat prin “preîncălzirea” solului pe o durată de 5 ani, adică expunerea feței superioare a modelului la variațiile orare ale temperaturii. Condițiile de contur aferente interiorului clădirii au fost înlocuite cu condițiile de exterior (funcția $T_{int}(t)$ a fost înlocuită cu funcția $T_{ext}(t)$). Datele de intrare pentru primul pas al simulării de “preîncălzire” sol în regim nestaționar sunt reprezentate de rezultatele câmpului de temperaturi obținut printr-o simulare în regim staționar pentru $T_{ext}(6889) = 10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ la partea superioară a modelului geometric și $T_p = 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ pentru partea inferioară a modelului.
- *Etapa 2* - chiar dacă regimul cvasi-staționar a fost atins în *Etapa 1* în sezonul doi de “preîncălzire” sol, abia începând cu pasul orar 6889 a anului 5 s-au introdus condițiile de contur specifice clădirii încălzite. S-a ales pasul orar 6889 deoarece corespunde începerii sezonului de încălzire în toate studiile întreprinse în această teză. Rezultatele obținute în *Etapa 2* a studiului sunt prezentate în Fig. 4.23 și în Tab. 4.19.



Fig. 4.23 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a 5 sezoane de încălzire ColtPlaca_30x30 m_Simil 1:10 – după inițializare model numeric de tip “preîncălzire” sol

Tab. 4.19 Variația pierderilor termice de la un an la altul pentru modelul ColtPlaca 30x30m_Simil 1:10 – după inițializare model numeric de tip “preîncălzire” sol

Sezonul de încălzire	1	2	3	4	5
Anul	AN1/AN2	AN2/AN3	AN3/AN4	AN4/AN5	AN5/AN6
Pierderi termice (Wh/sezon)	68349.66	53762.81	53364.98	53333.71	53338.03
Pierderi termice (kWh/sezon)	68.35	53.76	53.36	53.33	53.34
Reducere procentuală față de sezonul 1 [%]	-	21.34	21.92	21.97	21.96

Comparativ cu inițializarea modelului, făcută printr-o simulare în regim staționar în pasul 6889, în vederea determinării câmpului de temperaturi inițial, se remarcă că pentru ambele tipuri de studii (

Tab. 4.18 și Tab. 4.19), regimul cvasi-staționar (considerând condiția de atingere a acestuia ca diferența între valorile fluxului orar pentru două sezoane consecutive de încălzire < 1%) se atinge în sezonul 2 de încălzire al clădirii, iar diferența între valorile fluxului termic la nivel de sezon este ușor mai redusă între rezultatele sezonului 5 față de sezonul 2 pentru inițializarea făcută cu determinarea câmpului de temperaturi în clădire și în sol în regim staționar.

Studiile parametrice pentru alte dimensiuni ale plăcilor se continuă cu inițializarea făcută prin determinarea câmpului de temperaturi în clădire și în sol în regim staționar la pasul de timp 6889, fără “preîncălzire” sol.

De fapt, acest studiu a avut rolul de a identifica influența condițiilor de simulare asupra rezultatelor și a interpretării acestora. S-a urmărit dacă reducerea pierderilor de căldură față de primul sezon de încălzire a celorlalte sezoane poate reprezenta un efect de stocare al căldurii, specific primului an de încălzire, care apoi să fie menținut de la un an la celălalt sau nu.

Rezultatele acestui studiu converg înspre concluzia că reducerea procentuală a fluxului termic de la primul sezon de încălzire la cel de-al doilea sezon este semnificativ influențată de condițiile de simulare de la care se pornește analiza numerică în regim nestaționar.

4.3.5 Studiul parametric al transferului de flux termic de lungă durată la plăci pe sol de dimensiuni mari prin utilizarea modelului simil

S-au efectuat studii comprehensive pe durata a șase ani / cinci sezoane de încălzire a unor plăci pe sol cu următoarele caracteristici echivalente:

$$L_{1e} = L_{2e} = 50 \text{ m}, S = 2500 \text{ m}^2$$

$$L_{1e} = L_{2e} = 60 \text{ m}, S = 3600 \text{ m}^2 (\approx \text{placa de } 3500 \text{ m}^2)$$

$$L_{1e} = L_{2e} = 70 \text{ m}, S = 4900 \text{ m}^2 (\approx \text{placa de } 5000 \text{ m}^2)$$

$$L_{1e} = L_{2e} = 100 \text{ m}, S = 10000 \text{ m}^2$$

4.3.5.1 Simulare numerică de lungă durată cu pas orar a plăcii pe sol de dimensiune echivalentă 50x50 m

Pentru dimensiunile studiate s-au determinat pierderile de căldură spre sol de la un an la altul, pe durata a șase ani / cinci sezoane de încălzire. Durata investigată a fost condiționată de atingerea regimului cvasi-staționar. În Fig. 4.24 este redată variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a cinci sezoane de încălzire pentru placa de dimensiuni 50x50 m, iar în Tab. 4.20 este determinată reducerea procentuală a fluxului de căldură transmis prin placă de la primul sezon de încălzire până la atingerea regimului cvasi-staționar.

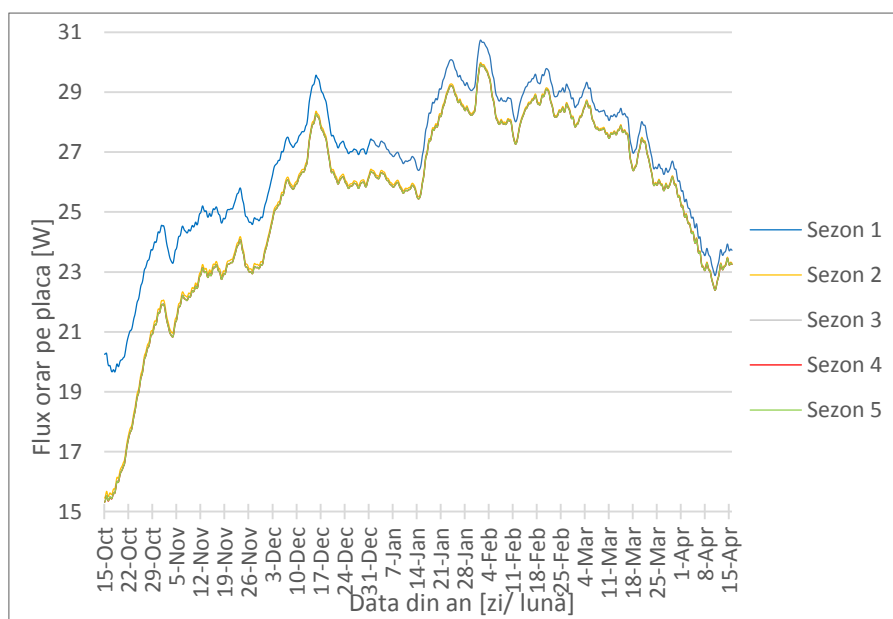


Fig. 4.24 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a 5 sezoane de încălzire ColtPlaca 50x50 m_Simil 1:10

Tab. 4.20 Variația pierderilor termice de la un an la altul pentru modelul Placa 50x50m_Simil 1:10

Sezonul de încălzire	1	2	3	4	5
Anul	AN1/AN2	AN2/AN3	AN3/AN4	AN4/AN5	AN5/AN6
Pierderi termice (Wh/sezon)	116920.53	111653.38	111348.05	111313.63	111313.65
Pierderi termice (kWh/sezon)	116.92	111.65	111.35	111.31	111.31
Densitate medie de flux (W/m^2)	192.27	183.61	183.10	183.05	183.05
Reducere procentuală față de sezonul 1 [%]	-	4.50	4.77	4.80	4.80

4.3.5.2 Simulare numerică de lungă durată cu pas orar a plăcii pe sol de dimensiune echivalentă 60x60 m

Pentru dimensiunea echivalentă a plăcii de 60x60 m rezultatele obținute sunt prezentate în Fig.4.25 și Tab. 4.21.

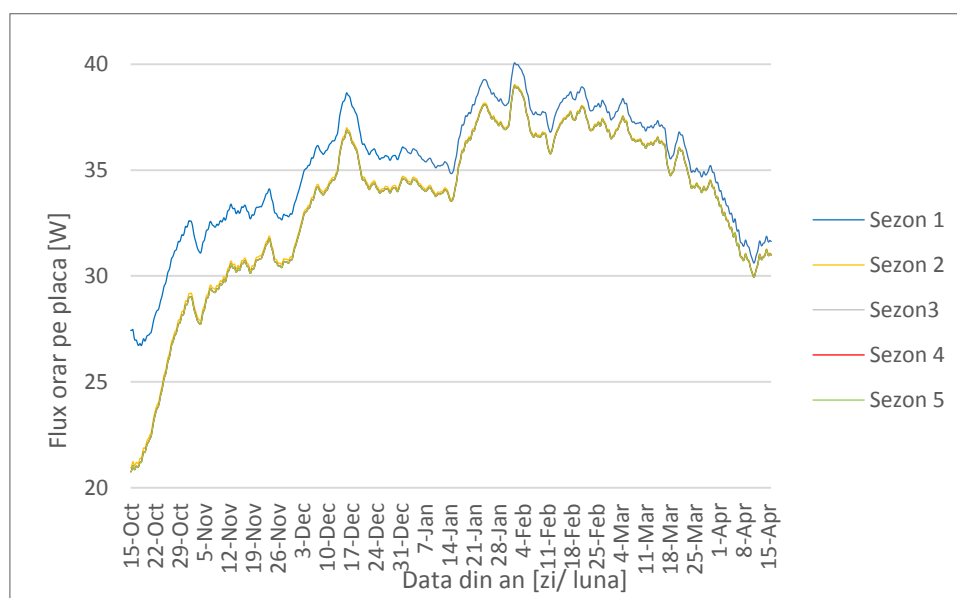


Fig. 4.25 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a cinci sezoane de încălzire ColtPlaca 60x60m_Simil 1:10

Tab. 4.21 Variația pierderilor termice de la un an la altul pentru modelul Placa 60x60m_Simil 1:10

Sezonul de încălzire	1	2	3	4	5
Anul	AN1/AN2	AN2/AN3	AN3/AN4	AN4/AN5	AN5/AN6
Pierderi termice (Wh/sezon)	154186.84	146982.73	146559.64	146529.40	146527.34
Pierderi termice (kWh/sezon)	154.19	146.98	146.56	146.53	146.53
Densitate medie de flux (W/m^2)	175.27	167.08	166.60	166.56	166.56
Reducere procentuală față de sezonul 1 [%]	-	4.67	4.95	4.97	4.97

4.3.5.3 Simulare numerică de lungă durată cu pas orar a plăcii pe sol de dimensiune echivalentă 70x70 m

Pentru dimensiunea echivalentă a plăcii de 70x70 m rezultatele obținute sunt prezentate în Fig. 4.26 și Tab. 4.22.

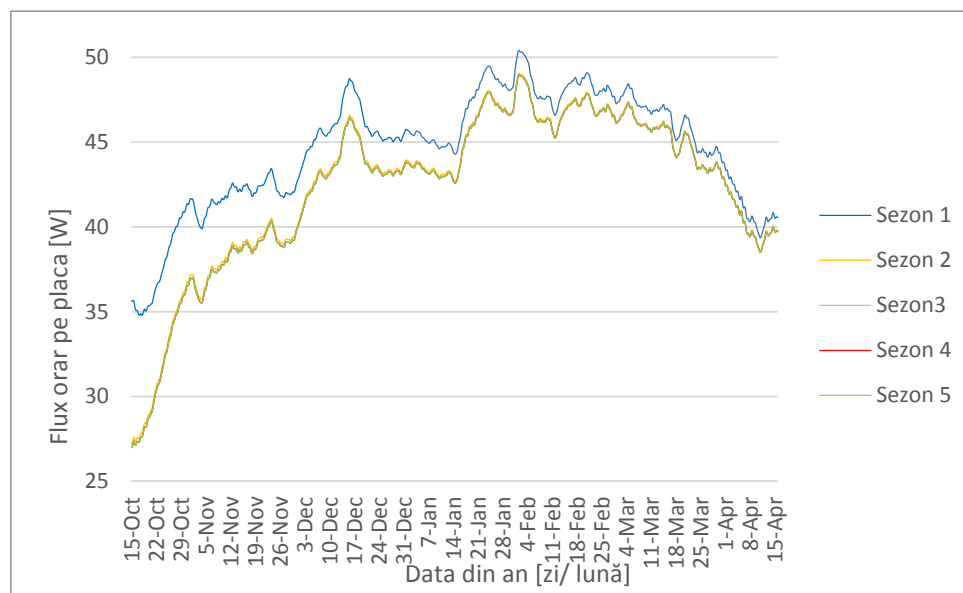


Fig. 4.26 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a cinci sezoane de încălzire ColtPlaca 70x70m_Simil 1:10

Tab. 4.22 Variația pierderilor termice de la un an la altul pentru modelul Placa 70x70m_Simil 1:10

Sezonul de încălzire	1	2	3	4	5
Anul	AN1/AN2	AN2/AN3	AN3/AN4	AN4/AN5	AN5/AN6
Pierderi termice (Wh/sezon)	195917.90	186497.46	185967.43	185933.71	185926.56
Pierderi termice (kWh/sezon)	195.92	186.50	185.97	185.93	185.93
Densitate medie de flux (W/m^2)	163.09	155.24	154.80	154.78	154.77
Reducere procentuală față de sezonul 1 [%]	-	4.81	5.08	5.10	5.10

4.3.5.4 Simulare numerică de lungă durată cu pas orar a plăcii pe sol de dimensiune echivalentă 100x100 m

Pentru dimensiunea echivalentă a plăcii de 100x100 m rezultatele obținute sunt prezentate în Fig. 4.27 și Tab. 4.23.

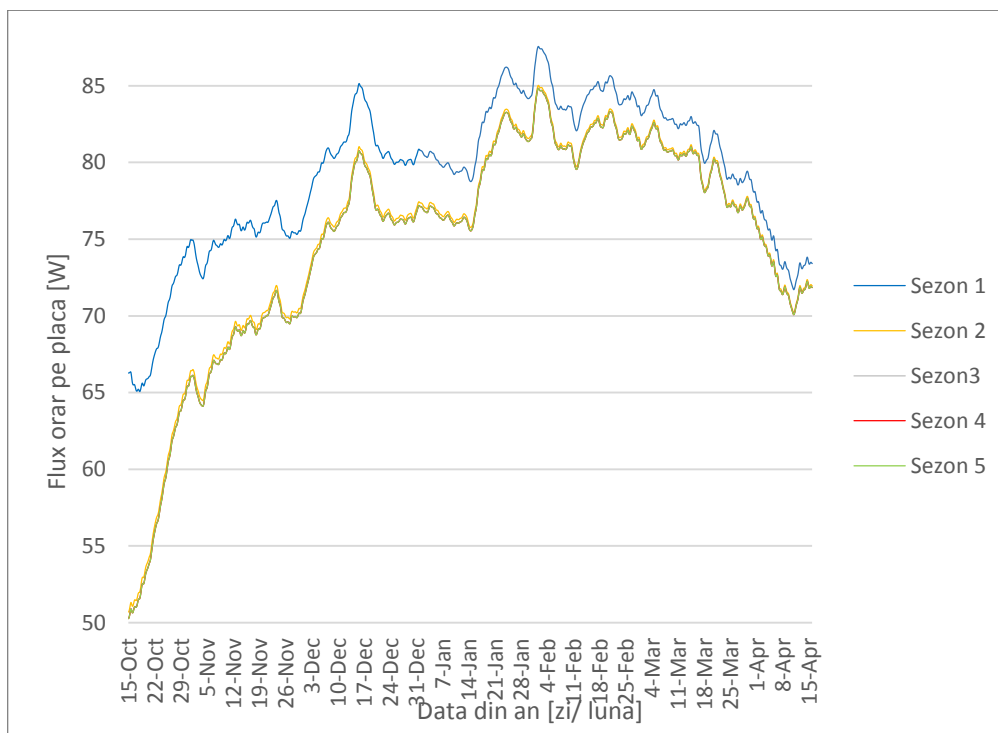


Fig. 4.27 Variația pierderilor de căldură spre sol pe durata a 5 sezoane de încălzire ColțPlaca 100x100m_Simil 1:10

Tab. 4.23 Variația pierderilor termice de la un an la altul pentru modelul Placa 100x100m_Simil 1:10

Sezonul de încălzire	1	2	3	4	5
Anul	AN1/AN2	AN2/AN3	AN3/AN4	AN4/AN5	AN5/AN6
Pierderi termice (Wh/sezon)	347920.04	330090.85	329102.29	329032.48	329027.76
Pierderi termice (kWh/sezon)	347.92	330.09	329.10	329.03	329.03
Densitate medie de flux (W/m^2)	141.08	133.85	133.45	133.42	133.42
Reducere procentuală față de sezonul 1 [%]	-	5.12	5.41	5.43	5.43

4.4 Efecte specifice identificate în transferul de căldură al plăcilor pe sol de dimensiuni mari

Rezultatele obținute prin studiile comprehensive efectuate, permit formularea unui răspuns la întrebarea de la care s-a pornit privind efectul proprietăților de inerție termică ale solului asupra procesului de transfer de căldură în cazul caracteristic al plăcilor pe sol de dimensiuni mari pentru perioade îndelungate de timp.

Reducerea transferului de flux termic, de la un sezon de încălzire la altul față de primul sezon de încălzire al clădirii, până la atingerea regimului cvasi-staționar și după atingerea lui (subcap. 4.3.4), evidențiată în Fig. 4.28 printr-o analiză a densității medii de flux termic, deși nu e concludentă, prefigurează un fenomen de stocare al căldurii sub placa pe sol, caracteristic clădirilor de dimensiuni mari.

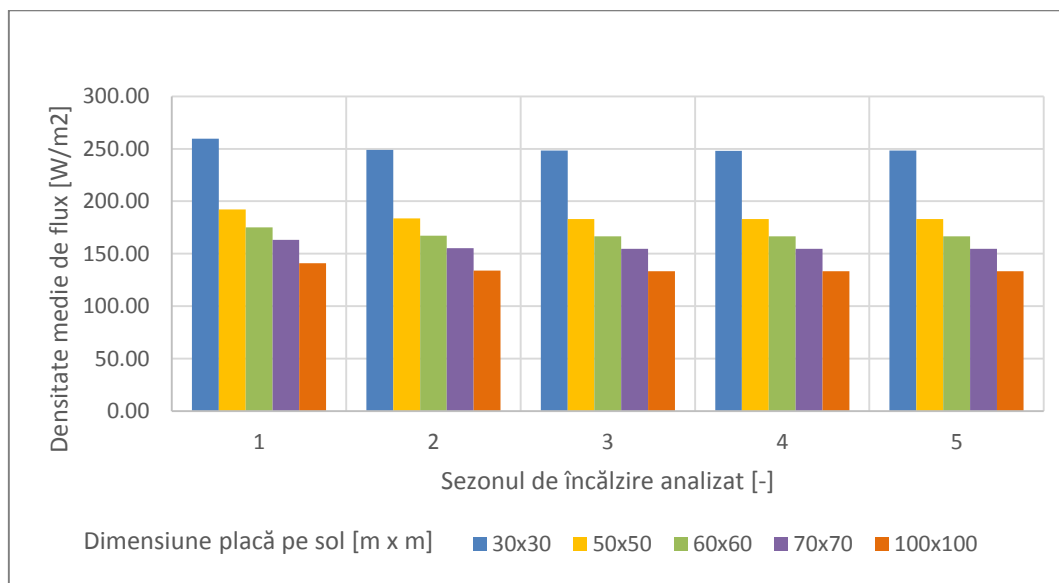


Fig. 4.28 Reducerea densității medii de flux la creșterea dimensiunilor plăcii pentru primele cinci sezoane de încălzire

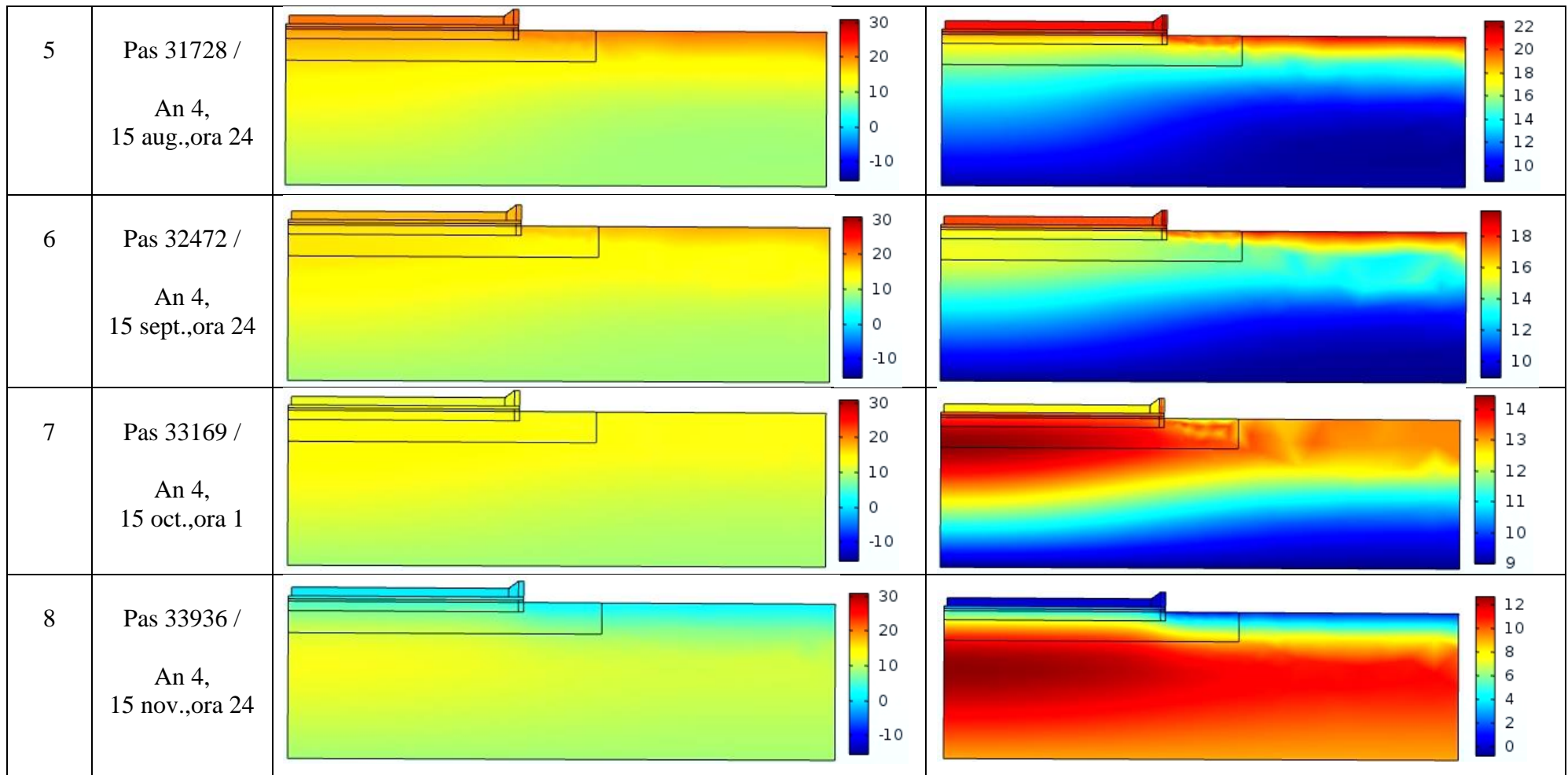
Pentru a analiza amploarea acestui fenomen s-au făcut studii suplimentare. Astfel, pentru modelul similitudinal al colțului bisimetric al plăcii pe sol de dimensiuni 30x30m (sc. 1:10), s-au modificat condițiile interioare de contur, în sensul că în interiorul clădirii (pe placă și pe pereții exteriori), funcția de temperatură constantă $T_{int}(t) = 20$ °C pe durata sezonului de încălzire, respectiv $T_{int}(t) = \max(\min((T_{ext}(t)), 25), 20)$ [°C] în restul anului, a fost înlocuită cu funcția temperaturilor exterioare orare $T_{ext}(t)$, începând cu anul 4, 15 aprilie, ora 24, care este sezonul de încălzire în care se atinge regimul cvasi-staționar. Studiul a fost realizat în această variantă pe durata unui an, până în anul 5, 15 aprilie, ora 24. Cu alte cuvinte, căldura a fost oprită pe durata unui sezon întreg de încălzire, după ce în prealabil a fost încălzită în sezoanele de iarnă anterioare.

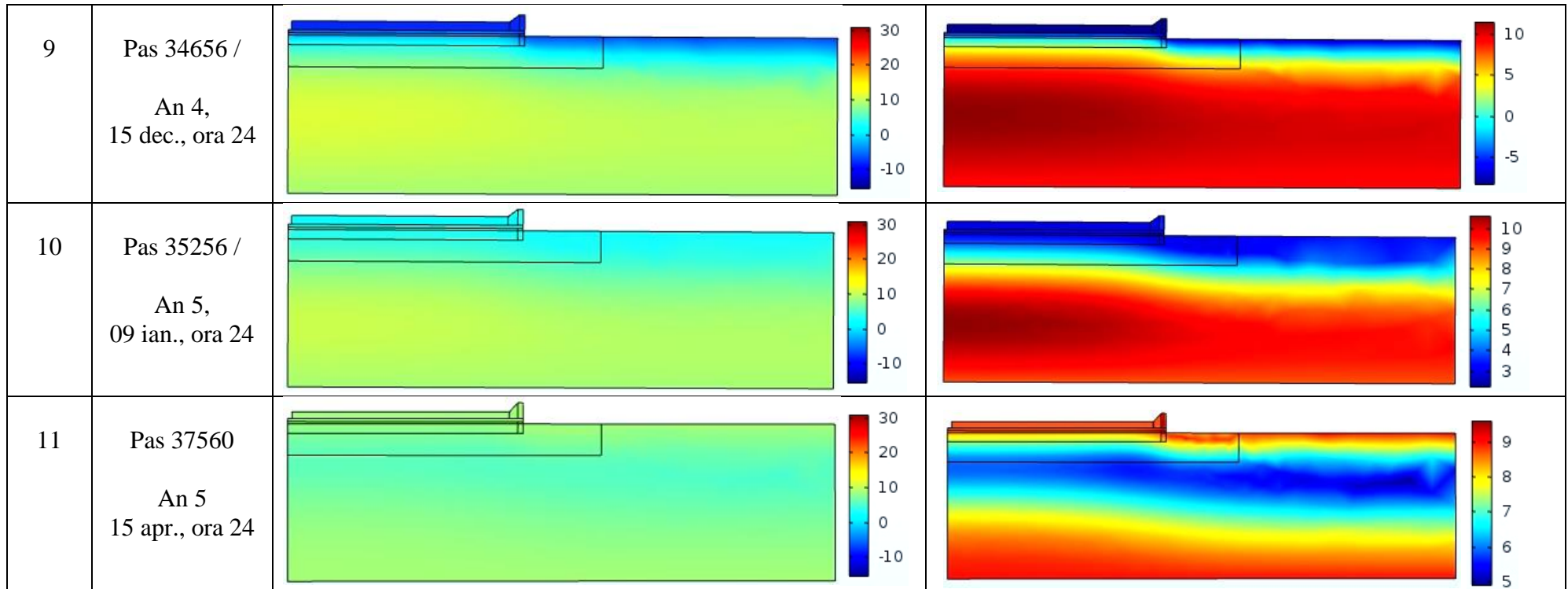
Acest tip de investigare a fost necesar datorită modului în care au fost construite și propuse modelele studiate în acest capitol, în sensul că în aceste modele pe toată durata anului temperatura aerului în interiorul clădirii este de minim 20°C. Prin ipoteza expunerii interiorului clădirii la variația temperaturilor exterioare orare se poate determina în cât timp se pierde căldura stocată în solul de sub placă.

Rezultatele sunt prezentate sub forma unor suprafețe izoterme, la intervale de timp de circa o lună, pentru secțiunea bidimensională efectuată în planul zOx , în centrul plăcii (vezi Tab. 4.24).

Tab. 4.24 Studiul distribuției temperaturilor sub placă în cazul opririi încălzirii pe durata unui an calendaristic – Model ColtPlaca 30x30m_Simil 1:10

Nr. crt.	Pas orar / Data	Suprafețe izoterme în planul xOz cu Legenda de temperaturi între limitele temperaturilor minimă și maximă la nivel de an	Suprafețe izoterme în planul xOz cu Legenda de temperaturi pe intervale locale de temperatură
1	Pas 28800 / An 4, 15 apr., ora 24		
2	Pas 29520 / An 4, 15 mai, ora 24		
3	Pas 30264 / An 4, 15 iun., ora 24		
4	Pas 30984 / An 4, 15 iul., ora 24		





Analizând suprafețele izoterme, se observă că după ce clădirea a fost încălzită în sezonul de încălzire, coroborat cu expunerea clădirii la sezonul de vară care urmează, căldurii stocate în sol îi ia aproape 9 luni să se disipe către exterior. Acest lucru face plauzibilă ipoteza stocării de la un an la altul în pământul de sub placă pentru o oarecare cantitate de căldură, datorată încălzirii interioare a clădirii, pentru că ea va intra în regimul de încălzire interioară în noul sezon de încălzire, înainte ca toată căldura înmagazinată în anul anterior să apuce să se disipe spre exterior.

Acest efect poate avea un impact în detaliile constructive optimizate energetic, referitor la modul de distribuire al termoizolației perimetrare astfel încât fenomenul de stocare identificat să fie potențat, în sensul că stocajul să fie cât mai mare, iar pierderile de căldură perimetrare spre exterior ale plăcii pe sol ale clădirii să fie cât mai mici, contribuind în mod direct la reducerea consumului energetic al clădirii, ca măsură pasivă.

Totodată, trebuie avut în vedere că a fost studiată o placă cu suprafața exterioară de 900 m². Întrebarea formulată inițial a primit un răspuns, care însă este urmat de o altă întrebare: ce se întâmplă cu acest efect pentru placa pe sol cu dimensiunea de 10000 m²? Un răspuns va fi oferit pentru această întrebare în cercetări ulterioare.

4.5 Comparația rezultatelor numerice cu rezultate obținute prin modele analitice

Acest studiu își propune să compare rezultatele pierderilor de căldură în sol, obținute prin efectuarea studiilor comprehensive prin aplicarea de metode numerice, cu metodele existente în normativele și standardele existente și aplicabile în țară la ora actuală. Astfel, pentru toate dimensiunile ale plăcii pe sol analizate în cadrul acestui capitol se face calculul pierderilor de căldură spre sol după metodele indicate în SR EN 13370:2017 [2], respectiv conform C107/5 – 2005 [3].

Pentru determinarea pierderilor de căldură spre sol pentru plăcile de dimensiuni 30x30 m, 50x50 m, 60x60 m, 70x70 m și 100x100 m, s-au respectat modelele propuse în cele două reglementări tehnice menționate. Condițiile principale ale determinării rezultatelor sunt centralizate în Tab. 4.25.

Tab. 4.25 Centralizator caracteristici modele analitice conform SR EN 13370 și C107/5

Model SR EN 13370:2017	Model C107/5-2005
<p>○ Relații utilizate pentru determinare pierderi de căldură spre sol la nivelul plăcii pe sol:</p> $Q = \Phi_{\text{sol}} \cdot t \text{ [kWh/sezon încălzire]}$ $\Phi_{\text{sol}} = H_{\text{sol}} \cdot (T_i - T_e) \text{ (conf. SR EN 14683 [73])}$ $H_{\text{sol}} = S \cdot U_{\text{sol}} + P \cdot \psi \text{ (conf. SR EN 13370:2017 [2])}$	
<p>○ Determinarea valorii ψ: Calcul numeric bidimensional în regim staționar pentru geometria: B = 4 m, z = 10 m. Celalalte dimensiuni sunt în</p>	<p>Preluare din catalog de punți termice, cu extrapolare valori existente pentru adaptarea la modelul studiat;</p>

<p>conformitate cu geometria utilizată în modelul numeric tridimensional (subcap. 4.2.1).</p> <p>Utilizare relație conf. SR EN ISO 10211:2017 (subcap. 12.4.3, Opțiune B) [1]:</p> $\Psi_{\text{per+placă}} = L_{2D} - h_{\text{per}} \cdot U_{\text{per}} - L_{2D,a}$ $\delta_{\text{per}} = 0.34 \text{ m}$ $h_{\text{per}} = 1 \text{ m}$ $\Psi_{\text{per}} = 0.122 \text{ W/(mK)}$ $\Psi_{\text{placă}} = 0.443 \text{ W/(mK)}$ <p>$L_{2D,a}$ - coeficient de cuplaj</p>	<p>În geometrie $z = 7 \text{ m}$ (pentru calcul R); restul dimensiunilor sunt în conformitate cu geometria utilizată în modelul numeric tridimensional.</p> $\Psi_{\text{per}} = 0.07 \text{ W/(mK)}$ $\Psi_{\text{placă}} = 1.580 \text{ W/(mK)}$
<p><i>Calculul coeficientului de transmisie termică spre sol, U_{sol}:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Pentru $d_f < B$, planșee neizolate sau izolate moderat: $U_{\text{sol}} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot B + d_f} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B}{d_f} + 1 \right)$ $d_f = \delta_{\text{per}} + \lambda \cdot (R_{\text{si}} + R_f + R_{\text{se}})$	$U_{\text{sol}} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta T_{\text{sol}}}{\Delta T} + \psi \cdot \frac{P}{S}$
<ul style="list-style-type: none"> Temperaturile la limită utilizate sunt: $T_i = 20^\circ\text{C}$ $T_e = -18^\circ\text{C}$ $T_{\text{sol}} = \text{limită adiabatică}$	$T_i = 20^\circ\text{C}$ $T_e = -18^\circ\text{C (pt. det. } \Delta T, \Delta T_p)$ $T_{\text{sol}} = 9^\circ\text{C}$
<p>Pentru determinarea pierderilor lunare de căldură a plăcii pe sol la nivel de sezon de încălzire, T_e utilizate s-au calculat sub forma unor valori lunare medii pe fiecare lună a sezonului de încălzire utilizat în acest capitol, ca medie a temperaturilor orare utilizate în funcția $T_{\text{ext}}(t)$.</p>	

Alte câteva date de intrare și rezultate intermediare sunt sintetizate în Tab. 4.26.

Tab. 4.26 Rezultate intermediare în calculul pierderilor de căldură prin relații analitice

Dimensiuni/Arii/Perimetre plăci				SR EN 13370			C107/5 - 2005	
$L_{1e} = L_{2e}$	$L_{1i} = L_{2i}$	S_i	P_i	B	U_{sol}	H_{sol}	U_{sol}	H_{sol}
[m]	[m]	[m ²]	[m]	[m]	[W/(m ² K)]	[W/K]	[W/(m ² K)]	[W/K]
30	29.32	859.66	117.28	14.66	0.328	335.55	0.315	456.08
50	49.32	2432.46	197.28	24.66	0.223	631.95	0.228	865.27
60	59.32	3518.86	237.28	29.66	0.194	788.75	0.206	1099.69
70	69.32	4805.26	277.28	34.66	0.172	949.91	0.191	1354.00
100	99.32	9864.46	397.28	49.66	0.129	1453.92	0.163	2236.25

Rezultatele pierderilor de căldură spre sol sunt comparate cu valorile extrapolate ale pierderilor obținute pentru sezonul 5 de încălzire, de la scara 1:10 la scara 1:1, obținute prin parametrizările modelelor numerice tridimensionale efectuate prin utilizarea modelului similar, pentru toată suprafața plăcii, în Fig. 4.29 și Fig. 4.30.

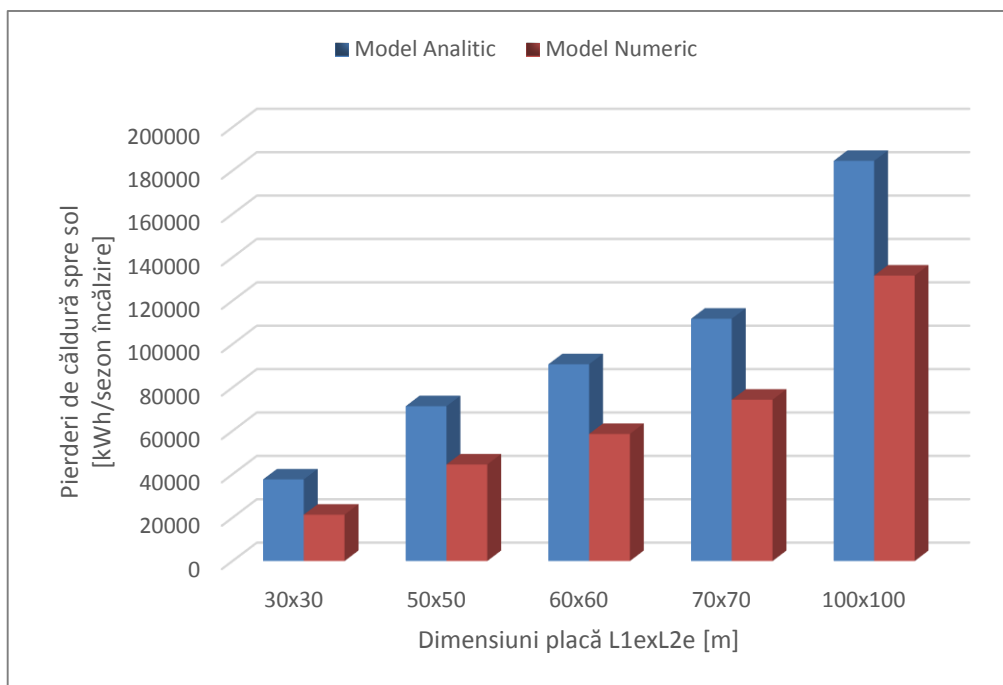


Fig. 4.29 Rezultate comparative între modelele analitice conform C107/5-2005 și modelele numerice comprehensive

Privitor la metodele de calcul indicate în normativul C107/5-2005 se remarcă faptul că față de rezultatele obținute prin determinarea numerică a coeficientului liniar de transfer termic în regim staționar, respectiv cu utilizarea unor relații analitice pentru calculul pierderilor de căldură a plăcii pe sol la nivel de sezon de încălzire, valorile pierderilor de căldură obținute prin modelări numerice tridimensionale în regim nestaționar corespunzătoare unui sezon de încălzire curent sunt semnificativ reduse. Practic, modelul utilizat astăzi la nivel național este mai mult decât “acoperitor”.

Aceste rezultate pot fi interpretate fizic în sensul că aceste modele, preponderent analitice, nu surprind efectul de stocare de căldură aferent masei termice a solului pe care sunt amplasate clădirile. Mai mult, așa cum rezultă indirect din studiul făcut în subcap. 4.4, o parte din căldura disipată către sol este, de fapt, stocată sub sol de la un sezon de încălzire la altul, un alt fenomen care nu este surprins de acest model.

O altă observație se referă la temperaturile la limită utilizate în acest model analitic pentru determinarea coeficientului liniar de transfer termic perimetral. Influența temperaturilor extreme (pentru zona climatică III unde este amplasat mun. Cluj-Napoca, $T_e = -18\text{ }^\circ\text{C}$), utilizate de regulă la dimensionarea echipamentelor de instalații, este impropriu de considerat pentru întregul sezon de încălzire în determinarea pierderilor de căldură perimetrice, deoarece pe durata unui sezon de încălzire clădirea este supusă variației orare a temperaturilor, care de altfel foarte rar sunt foarte scăzute (pentru temperaturile orare din Cluj-Napoca vezi Fig. 4.9). Așadar, utilizarea temperaturii exterioare extreme (specifică dimensionării instalațiilor de

încălzire) nu este o ipoteză care să reflecte în mod realist comportamentul clădirii la fenomenul fizic real, în cazul analizei pierderilor de căldură perimetrice intensificate.

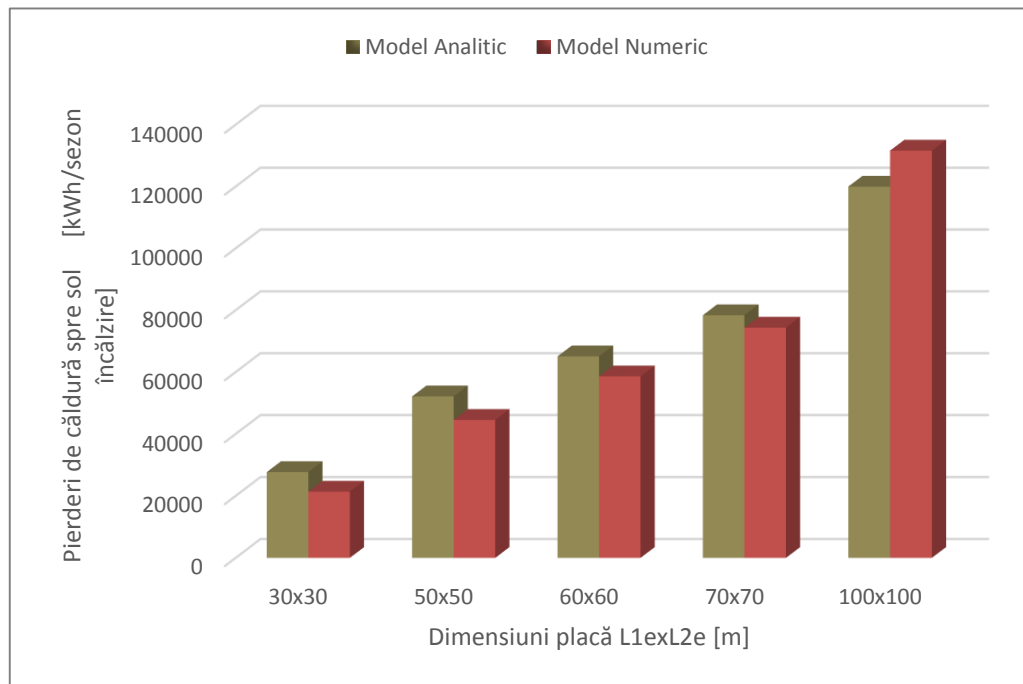


Fig. 4.30 Rezultate comparative între modelele analitice conform SR EN13370 și modelele numerice comprehensive

Privitor la rezultatele obținute prin metodele precizate în standardul SR EN 13370, se remarcă că acestea sunt mult mai apropiate de rezultatele obținute prin modelele numerice comprehensive.

4.6 Contribuții și concluzii

Contribuțiile teoretice proprii dezvoltate în acest capitol constau în:

- Fundamentarea unui model teoretic utilizând teoria similitudinii, care permite scalarea modelelor numerice de dimensiuni mari, cu formularea relației matematice care permite extrapolarea rezultatelor fluxului termic la scara inițială permițând astfel o interpretare facilă și totodată riguroasă a rezultatelor. Modelul simil dezvoltat permite analize pe modele geometrice mult reduse, ceea ce oferă acces la efectuarea de studii comprehensive îndelungate pe modele tridimensionale a transferului de căldură la clădiri de dimensiuni mari și interacțiunea lor cu solul, modele care până acum nu erau foarte accesibile, datorită consumului prohibitiv de resurse computaționale;
- Se remarcă potențialul de generalizare al aplicabilității modelului simil propus, în sensul posibilității utilizării acestuia și pentru alte studii ale transferului de flux termic ale clădirii la interacțiunea cu terenul și cu mediul exterior (subsoluri încălzite, subsoluri neîncălzite, sub toată clădirea sau parțiale), etc.;

- Revenind la ipoteza lui Leonăchescu redată în subcap. 4.1.1, că doar în cazul existenței apei subterane o parte fluxul termic se disipă spre stratul de apă subterană [80], stadiul actual al cunoașterii se completează cu rezultatele studiilor comprehensive întreprinse în această teză, concluziile fiind că și în absența apei subterane o parte din fluxul termic se disipă spre sol, datorită proprietăților de masă termică ale pământului, așa cum rezultă din rezolvarea ecuației căldurii în regim nestaționar pe durate îndelungate de timp, cel puțin pentru clădirile de dimensiuni mari, care au făcut obiectul acestor studii;
- Se poate enunța că nu condiția de existență a apei subterane este cauza căreia o parte din fluxul termic se disipă spre sol, ci proprietățile de inerție termică ale pământului, așa cum rezultă din rezolvarea ecuației căldurii în regim nestaționar pe durate îndelungate de timp, cel puțin pentru clădirile de dimensiuni mari.
- Mai mult, prin studiile efectuate în acest capitol s-a demonstrat că în cazul încălzirii clădirii o parte din căldura care se disipă către sol se menține în solul de sub placă de la un an la altul, de la un sezon de încălzire la următorul sezon de încălzire, demonstrându-se astfel un fenomen de stocare al căldurii în sol, care duce la reducerea pierderilor de căldură ale elementului de anvelopă placa pe sol, implicit la reducerea consumului de căldură al clădirii la nivel de sezon de încălzire. Se remarcă potențialul de aplicabilitate al acestui efect în optimizarea energetică a anvelopei acestor clădiri;

Contribuțiile aplicative din acest capitol sunt:

- Aplicarea condițiilor de contur de tip Dirichlet și Neumann în rezolvarea ecuației diferențiale parțiale de tip Laplace (ecuația căldurii în regim staționar fără surse de căldură), cu Metoda Elementului Finit pe un exemplu manual de calcul - cazul unidirecțional – în subcap. 4.1.2;
- Identificarea și testarea parametrilor: rețea de discretizare, subpasul de simulare, tipul de algoritm utilizat (direct sau iterativ), care influențează rezultatele simulărilor numerice în regim termic nestaționar – în subcap. 4.3.1;
- Verificarea influenței metodei de inițializare în studiile numerice în regim nestaționar printr-o variantă de simulare inițială în regim staționar - în subcap. 5.4.4;
- Studiile parametrice efectuate prin modelul simil propus pentru dimensiuni mari de plăci (50x50 m, 60x60 m, 70x70 m și 100x100 m) și interacțiunea acestora cu solul permit înțelegerea modului în care clădirea interacționează cu solul din punct de vedere termotehnic pe termen lung;
- Față de actualele modele propuse în reglementările tehnice aplicabile la nivel național, s-a identificat o diferență semnificativă, mai ales comparativ cu metodele indicate în C107/5-2005 [3].

Capitol 5 Aplicarea tehnicilor de Inteligență Artificială în studiul transferului de căldură la plăci pe sol de dimensiuni mari

5.1 Fundamentarea oportunității introducerii Inteligenței Artificiale în aplicații în inginerie civilă și considerații teoretice

5.1.1 Inteligență Artificială în inginerie civilă

Pe lângă modelele propuse prin utilizarea teoriei similitudinii, o alternativă de abordare a modelelor bazate pe metode numerice pentru modele de dimensiuni mari analizate în regim nestaționar, o pot reprezenta metodele bazate pe Inteligență Artificială.

Inteligența Artificială are o utilizare relevantă la nivel mondial în ultimii ani, în multiple domenii ca și: clasificarea datelor [116], diagnosticarea bolilor [117], prognoza meteo [58], previziuni cu privire la durata de viață a motoarelor în ingineria aeronautică [118], ingineria materialelor (predicționarea rezistenței la compresiune a betoanelor de înaltă performanță) [119], inginerie electrică - în probleme de interferențe electromagnetice [120], [121], etc..

În domeniul ingineriei civile și HVAC, există o serie de studii întreprinse în vederea predicționării consumului de energie în clădiri:

Astfel, Kalogirou și Bojic [122] au utilizat rețele neuronale artificiale (RNA) pentru predicționarea consumului de energie al unei case pasive solare, pentru grosimi diferite ale pereților, în ipoteza clădirii complet termoizolate, respectiv cu termoizolare parțială, cu date preluate din simularea numerică utilizând metoda diferențelor finite efectuată pe durata a două sezoane (iarnă, vară). Limita acestui model constă în predicționarea pe o durată scurtă de timp, de 12 h, însă rămâne una dintre primele aplicații în inginerie civilă utilizând Inteligența Artificială.

Kreider și Wang [123] au utilizat rețele neuronale artificiale pentru a predicționa consumul de energie în clădiri comerciale. Neto și Fiorelli [124] au făcut o comparație a consumului de energie al unei clădiri administrative, predicționat printr-un model bazat pe rețele neuronale artificiale și un model obținut cu simulatorul pentru clădiri Energy Plus, bazat pe modele comprehensive de rezolvare a ecuațiilor termodinamice.

Ekici și Aksoy [125] au utilizat un model bazat pe Inteligență Artificială care predicționează necesarul de căldură al clădirii. Tipul de date de intrare ale modelului propus a constat în: orientarea cardinală, procentul de suprafețe vitrate, existența sau nu a termoizolației, inclusiv cu patru grosimi distincte ale termoizolației, respectiv un set de valori precalculate ale necesarului de încălzire pentru anumite combinații ale caracteristicilor clădirii luate în considerare. Limita acestui model constă în necesarul de încălzire precalculat pentru combinațiile utilizate în datele de intrare, determinat cu metode numerice (metoda diferențelor finite) în regim nestaționar, însă pentru cazul unidirecțional.

Utilizarea Inteligenței Artificiale în predicționarea consumurilor de energie în clădiri duce la o schimbare a paradigmei în acest domeniu, pentru că dacă metodele tradiționale ingineresti se bazează pe utilizarea ecuațiilor termodinamice [126] sau pe experimente fizice [122], metodele propuse în Inteligența Artificială utilizează un istoric de date ca să predicționeze consumurile de energie în anumite condiții.

Principalul avantaj în utilizarea Inteligenței Artificiale în predicționarea consumurilor de energie îl reprezintă economia de timp față de ceea ce presupune modelarea în regim nestaționar a tuturor proceselor fizice care intervin în determinarea “tradițională” a consumurilor de energie într-o clădire.

Aceste aspecte fiind cunoscute, s-a întrevăzut potențialul de aplicabilitate al metodelor utilizate în Inteligența Artificială, pentru a substitui modelele (plăci pe sol de dimensiuni mari) analizate prin metode numerice cu pas orar în capitolul 4, cu aceste metode, cu scopul de a reduce timpul de analiză, respectiv cu un al doilea scop de a continua analiza tridimensională orară (care consumă resurse semnificative de timp și stocaj în calculator), pe durata a mai mulți ani.

În această teză s-au propus două aplicații în termotehnica construcțiilor, implicit în ingineria civilă, utilizând rețele neuronale artificiale:

- *Aplicația 1* – are ca scop optimizarea (reducerea) timpului necesar studiului numeric de lungă durată a transferului de flux termic, prin introducerea unei aplicații utilizând Inteligența Artificială, care permite predicționarea valorilor de flux termic pe o placă pe sol, cu pas orar, pe perioade mari de timp în anumite condiții; reprezintă continuarea analizei numerice cu o aplicație în AI;
- *Aplicația 2* - permite predicționarea răspunsului termic al clădirii, în acest caz pierderile de căldură orare ale unei plăci pe sol pentru o dimensiune distinctă (60x60 m), în urma învățării răspunsurilor de la alte dimensiuni de plăci pe sol (30x30 m, 50x50 m, 70x70 m, 100x100 m); aplicație AI pe baza modelelor parametrizate elaborate cu metode numerice în cap. 4.

5.1.2 Descriere metode specifice Inteligenței Artificiale: Rețele Neuronale Artificiale

Deși este un domeniu aparent îndepărtat de ingineria civilă, prin identificarea principalelor caracteristici ale rețelelor neuronale artificiale se poate identifica cu ușurință potențialul de aplicabilitate al acestora în ingineria civilă.

Printre principalele caracteristici ale rețelelor neuronale sunt [127], [122], [128]:

- Au o capacitate de învățare generalizată, iar pe baza instruirii lor pot recunoaște informația cheie caracteristică unor procese complexe, oferind soluții pe baza datelor care le-au fost prezentate;
- Sunt neliniare, astfel că rețin interacțiuni complexe între variabilele sistemului;

- Au posibilitatea de reproducere a secvențelor, iar prin generalizare inclusiv cu completarea formelor (modelelor proceselor complexe) în regim dinamic;
- Sunt independente de relațiile matematice care descriu procesul, fiind dependente de istoricul datelor măsurate al proceselor analizate direct.

Printre tipurile de probleme caracteristice rezolvării prin implementarea de rețele neuronale artificiale se menționează [129]: probleme de tip *reproducere a secvențelor* (“*pattern recognition*”) sau probleme de tip *aproximare de funcție* (“*function approximation*”).

Aceste aspecte fiind cunoscute din literatura de specialitate, se poate trece la specificul proceselor de transfer termic în regim nestaționar studiate în această teză în cap. 4, caracterizat de numărul mare al datelor de ieșire din analiza numerică – valori ale fluxului termic orar la suprafața plăcii pe durata a mai multor ani investigați (adică, existența unui “istoric de date”, pe baza căruia rețelele neuronale se pot antrena).

De ce ar fi necesară o asemenea abordare? Pentru a se rezolva o problemă majoră identificată, și anume consumul mare de resurse pentru a face asemenea analize: durata mare necesară simulărilor numerice (mai ales dacă nu se utilizează teoria similitudinii), respectiv memoria consumată de către calculator, într-un domeniu de cercetare în care nivelul cunoștințelor este încă limitat, așa cum s-a demonstrat în cap. 4, pe un subiect general de foarte mare interes la nivel internațional: reducerea consumului de energie în clădiri și a emisiilor de CO₂.

Astfel, se poate remarca faptul că specificul problematicii din ingineria civilă studiat în această teză: transferul termic la plăci pe sol de dimensiuni mari pentru perioade îndelungate de timp, îndeplinește caracteristicile necesare care să-i permită implementarea în aplicații în Inteligență Artificială.

Rețelele neuronale artificiale pot fi rețele feedforward, în buclă deschisă sau rețele recurente, dinamice [127]. În aplicațiile propuse în acest capitol s-au utilizat rețele neuronale de tip feedforward multistrat.

Principalele etape care se parcurg în construirea unui model cu rețele neuronale sunt:

- **Colectarea datelor de intrare;**
- **Preprocesarea datelor;**
- Stabilirea arhitecturii rețelei neuronale;
- Inițializarea ponderilor și polarizărilor;
- **Antrenarea rețelei neuronale;**
- Validarea rețelei neuronale;
- **Testarea rețelei neuronale;**
- Utilizarea rețelei în aplicația dorită.

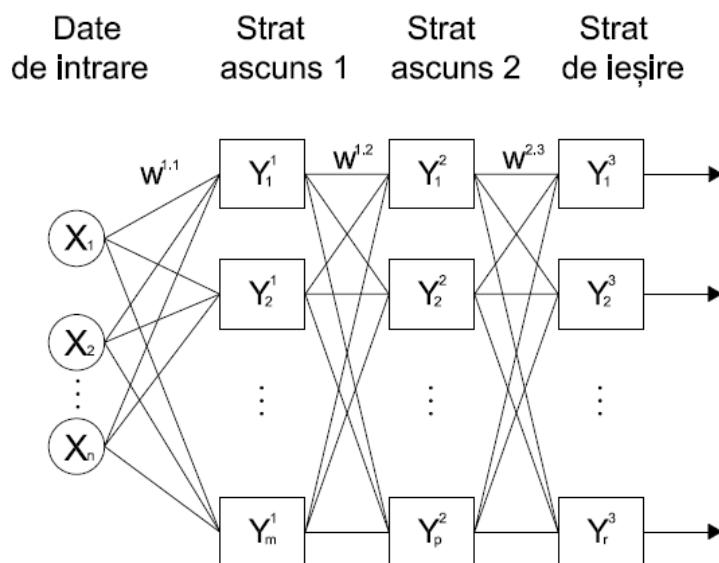
Datele care se **colectează** în vederea antrenării rețelei neuronale sunt în funcție de specificul aplicației. Astfel, în domeniul predicționării consumului de energie al unei clădiri, datele care se colectează (sub forma de valori numerice) sunt, de exemplu: date meteorologice, date despre ocupare, istoric de consumuri, temperatură interioară, umiditate interioară [126], sezon analizat, existența sau nu a termoizolației, grosimea pereților [122].

Pentru cele două aplicații propuse în acest capitol, datele de intrare se consideră: anul analizat – anul „i”, ora „j” din an, iar în aplicația doi se mai adaugă și dimensiunile plăcii (L_{1e} , L_{2e}). Datele de ieșire țintă pentru ambele aplicații sunt valorile fluxului termic pe suprafața plăcii obținut în modelarea numerică cu pas orar, aferent orei „j” din anul „i” pentru dimensiunile corespondente. Scopul introducerii acestor date de intrare și de ieșire este ca rețelele neuronale să „învețe” caracteristicile sistemului fizic analizat numeric, pentru a putea predicționa valorile de ieșire specifice sistemului analizat, în lipsa analizei numerice.

Preprocesarea datelor de intrare constă în aranjarea datelor numerice sub formă de matrici, vectori coloană sau vectori linie, cu pregătirea lor pentru a ajuta procesul de antrenare, de exemplu maparea lor prin diverse procedee matematice pe intervale de valori care să fie corepunzătoare funcțiilor de transfer. Ulterior datele de intrare sunt împărțite în trei subseturi: date pentru antrenare, date pentru validare și date pentru testare. Primul subset are procentul cel mai mare din datele de intrare, pe baza celui de-al doilea se verifică erorile pe durata antrenării, iar al treilea, nu se folosește în procesul de antrenare, dar cu el se verifică dacă rețeaua deja antrenată are ieșiri sub valoarea indicatorului de calitate dorit.

Pentru a crea **arhitectura unei rețele neuronale** se respectă următorii pași [127]:

- Alegerea unui număr de straturi pentru rețeaua neuronală (de ex. 1 sau 2);
- Utilizarea unei funcții de activare (f_a) a fiecărui strat;
- Propunerea numărului de neuroni pe fiecare strat;
- Stabilirea tipului de conexiuni între straturi.



$$Y^1 = f_a^1(\Sigma W^{1.1T} \cdot X_n + B_m^1) \quad Y^2 = f_a^2(\Sigma W^{1.2T} \cdot Y^1 + B_p^2) \quad Y^3 = f_a^3(\Sigma W^{2.3T} \cdot Y^2 + B_r^3)$$

Fig. 5.1 Schema principală a unei rețele neuronale feedforward multistrat

Funcțiile de activare (cunoscute și sub denumirea de funcții de transfer), sunt funcții matematice atașate neuronului, în care argumentul funcției este suma mărimilor de intrare ponderate prin coeficienți („weights”), la care se însumează un parametru numit polarizare („bias”), și care permit transformarea datelor de intrare în datele de ieșire furnizate de neuron. Pentru neuronii din straturile ascunse se utilizează, de regulă, funcții de activare sigmoide

(logaritmică sau tangentă hiperbolică), iar pentru neuronii din stratul de ieșire se utilizează funcția liniară [127], [130], [128].

În Fig. 5.1 semnificația cifrelor în notația ponderilor ($w^{1.1}$) este următoarea: prima cifră reprezintă sursa (stratul) de pe care neuronul primește datele de intrare, a doua cifră reprezintă stratul spre care ies datele în cadrul rețelei neuronale, ponderile aferente fiecărui strat de neuroni fiind de fapt aranjate sub formă de matrici, de forma (exemplu pentru ponderile care ajustează datele de intrare a+ferente celor m neuroni din stratul ascuns 1):

$$\begin{bmatrix} w_{1.1}^{1.1} & w_{1.2}^{1.1} & w_{1.m}^{1.1} \\ w_{2.1}^{1.1} & w_{2.2}^{1.1} & w_{2.m}^{1.1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{n.1}^{1.1} & w_{n.2}^{1.1} & w_{n.m}^{1.1} \end{bmatrix}$$

Există autori care au utilizat relații pentru determinarea numărului de neuroni de pe fiecare strat ascuns, astfel Kalogirou și Bojic [122] au propus formula empirică (5-1), în cazul utilizării unui singur strat ascuns de neuroni:

$$N = \frac{1}{2}(n + r) + \sqrt{S} \quad (5-1)$$

unde:

- N – numărul de neuroni de pe stratul ascuns;
- n – numărul de vectori de intrare în RNA;
- r – numărul de vectori de ieșire din RNA;
- S – numărul de seturi de date de antrenare a RNA;

Pentru rețelele neuronale feedforward multistrat, unii autori utilizează teorema lui Kolmogorov, care aproximează o funcție neliniară de mai multe variabile prin intermediul altor funcții [127], [131]. Interpretarea teoremei în teoria rețelelor neuronale duce la relațiile prin care se determină: $n(2n+1)$ neuroni pe primul strat ascuns, și $2n+1$ neuroni pe al doilea strat ascuns, unde n – numărul datelor de intrare (numărul vectorilor).

Inițializarea ponderilor și a polarizărilor este un pas care se face înaintea antrenării rețelei, în general cu valori numerice alese în mod aleator.

Antrenarea rețelei este pasul cel mai important în implementarea unei rețele neuronale și implică ajustarea ponderilor și a polarizărilor până când se obține performanța dorită între datele de intrare și datele de ieșire, și presupune ajustarea acestor valori până când eroarea medie pătratică între datele de intrare și datele de ieșire este sub o valoare impusă.

Pentru ajustarea ponderilor și polarizărilor se utilizează algoritmi de optimizare numerică: metoda gradientului descrescător, metoda gradientului conjugat [132], [133] sau metode de tip Newton [134], aplicate în cadrul algoritmului propagării înapoi de bază [135], [130], [127], [129].

Algoritmul propagării înapoi de bază are rolul de a ajusta parametrii rețelei (ponderi și polarizări), cu scopul de a minimiza eroarea medie pătratică dintre valorile din vectorii țintă de ieșire și valorile din vectorii obținuți ca urmare a parcurgerii rețelei pornind de la valorile din vectorii de intrare, și constă, principal, în [129]:

- *Pasul 1* - parcurgerea datelor de intrare prin rețea dintr-un strat în altul, ieșirea de pe un strat fiind intrarea pentru următorul strat, așa cum se vede în Fig. 5.1;
- *Pasul 2* – aplicarea algoritmului de gradient descrescător pentru aproximarea erorii medii pătratice, pentru determinarea ponderilor și polarizărilor la iterația $k+1$, funcție de valorile de la iterația k (conțin derivatele parțiale ale erorii în raport cu ponderile și polarizările, care prezintă o dificultate ridicată în a fi determinate direct);
- *Pasul 3* - propagarea înapoi a sensibilităților erorilor de la ultimul strat la primul strat al rețelei;
- *Pasul 4* – ajustarea ponderilor și polarizărilor cu algoritmul de la pasul 2, utilizând funcțiile determinate la pasul 3.

Simultan cu procesul de antrenare se efectuează și **validarea** rețelei prin verificarea erorilor din subșetul al doilea de date.

După ce rețeaua **se testează** cu datele pregătite în al treilea subset al datelor de intrare, aceasta **se poate utiliza** în aplicația dorită.

5.1.3 Algoritmul Bayesian de regularizare a ponderilor RNA

Câteva considerente teoretice se amintesc despre algoritmi de învățare, în mod particular despre algoritmul Bayesian, care are ca fundament teorema lui Bayes din teoria probabilităților [136], [129], [137]:

$$P(M|N) = \frac{P(N|M) \cdot P(M)}{P(N)} \quad (5-2)$$

unde:

$P(M)$ – probabilitate prealabilă, o probabilitate evaluată înainte de a face conexiuni cu anumite observații relevante;

$P(M|N)$ – probabilitate posterioară, o probabilitate evaluată în funcție de observațiile relevante;

$P(N|M)$ – probabilitatea condițională a lui N cunoscându-se M ;

$P(N)$ – probabilitatea marginală a lui N .

Introdusă în teoria rețelelor neuronale artificiale, analiza Bayesiană se utilizează în controlarea valorilor ponderilor. Varianta dezvoltată de MacKay [138] pornește de la ipoteza că ponderile sunt variabile aleatorii. Se aplică teorema lui Bayes, termenii acesteia conținând: setul de date de antrenare, arhitectura rețelei (număr de straturi, număr de neuroni), ponderile și polarizările rețelei, parametrii de regularizare. Regularizarea propusă în această metodă restricționează ponderile (evitându-se să devină prea mari) prin adăugarea unui termen format din parametrii de regularizare la eroarea medie pătratică [129].

Această metodă este și o metodă de optimizare a antrenării rețelelor neuronale artificiale, scopul final fiind o generalizare bună a rețelei după ce aceasta a fost antrenată, adică posibilitatea ca aceasta să poată predicționa datele de ieșire corespondente unui set de date nou care nu au fost folosite în procesul de antrenare.

S-a menționat despre acest algoritm pentru că prin el se răspunde și unei alte mari probleme imputate Inteligenței Artificiale și anume că “corelarea nu implică cauzalitate” [139].

Ce implică această sintagmă? Se explică la nivelul aplicațiilor propuse în această teză. Astfel, prin implementarea celor două aplicații propuse în acest capitol se reușește substituirea parțială sau totală a rezolvării legii lui Fourier și ecuației lui Fourier, în final ajungându-se la o corelare foarte bună a rezultatelor obținute de rețelele neuronale versus rezultatele obținute prin analiză numerică în regim nestaționar pe geometrii tridimensionale, așa cum este evidențiat în subcap. 5.2 (a se vedea Fig. 5.3, Tab. 5.2).

Cum se reușește acest lucru? Prin implementarea teoriei probabilității în rețelele neuronale, se reușește identificarea unor conexiuni condiționate care există între datele de intrare și cele de ieșire, iar pe baza calculului probabilistic se determină valorile optime ale ponderilor și polarizărilor. Această metodă implementată, practic, determină cauzalitatea dintre datele de intrare și ieșire, permițând rețelelor neuronale să se antreneze corect, iar apoi să predicționeze corect.

Ce înseamnă asta? Înseamnă că această metodă este o metodă alternativă care demonstrează că afirmația de mai sus nu este corectă, și implicațiile sunt foarte mari, pentru că reușește să substituie controlat, cu succes, ecuații care descriu legile fizice specifice proceselor, în cazul de față procesul de transfer de căldură în solide.

Deși au fost testați și utilizați mai mulți algoritmi de învățare, așa cum se va vedea în subcapitolele următoare, regularizarea Bayesiană a fost cea care a furnizat cele mai bune rezultate pentru cele două aplicații propuse în acest capitol, așadar se face observația că este un *algoritm de învățare favorabil specificului datelor aferente problematicii studiate*: transferul de căldură în regim nestaționar la plăci pe sol de dimensiuni mari.

5.2 Aplicația 1 în AI implementată printr-o metodă hibridă de tip “grey box” [140]

Pierderile de căldură a plăcilor pe sol de dimensiuni mari, pe durate lungi de timp, ca parte componentă a bilanțului energetic în determinarea necesarului de energie și consumului de energie este un subiect puțin cercetat, deși există numeroase clădiri în fondul de clădiri existent a căror destinație, respectiv procese funcționale sau tehnologice necesită dimensiuni mari, în special în sectorul nerezidențial: clădiri comerciale (hypermarket-uri, mall-uri), clădiri de producție, clădiri de birouri, care, de regulă, deservește companii multinaționale, etc.

Integrarea acestui subiect în tematica mai largă a consumurilor de energie a clădirilor și a emisiilor de CO₂, cu scopul reducerii lor în context global, duce la identificarea unei breșe. Așa cum se poate observa în cap. 4, modelele analitice utilizate la momentul actual, eventual combinate cu modele numerice în regim staționar, pot furniza diferențe semnificative față de metodele numerice în regim nestaționar cu pas orar, ceea ce transpus în lumea reală, înseamnă evaluări inexacte ale performanței termice ale elementelor de clădire care sunt în contact cu solul, și, subsecvent, predicții inexacte al consumului de energie al clădirii.

Pe un principiu analog identificării cauzei în vederea evaluării efectelor, respectiv a predicționării lor, se consideră că studiul comprehensiv pe perioade investigate de timp lungi

este varianta care se pretează cel mai bine specificului acestei problematice, al transferului de căldură la plăci pe sol de dimensiuni mari.

Așa cum se poate observa în cap. 4, una dintre problemele semnificative identificate în studiul comprehensiv al plăcilor pe sol de dimensiuni mari este consumul semnificativ de resurse computaționale și de timp. O soluție s-a identificat în cap. 4, cu propunerea modelului “simil” aplicabil în modelarea numerică, însă, în continuare, s-au căutat și alte soluții. Pentru a găsi o alternativă eficientă acestei probleme, o schimbare de paradigmă este necesară astfel că metodele tradiționale specifice ingineriei se combină cu tehnicile specifice Inteligenței Artificiale, iar în acest subcapitol se propune o metodă hibridă.

Pentru a elimina o problemă specifică aplicării metodelor numerice de rezolvare a ecuațiilor termodinamice specifice problematicei studiate pe modele geometrice mari, respectiv pentru intervale lungi de timp investigate, și anume efortul de calcul și timpul computațional ridicat, se propune o aplicație de Inteligență Artificială, care are scopul de a predicționa transferul de flux termic la suprafața plăcii pe sol, caracteristic interacțiunii clădirii cu solul, pe baza unui “istoric” de date obținut în prealabil cu metode numerice, într-un timp semnificativ mai redus, decât dacă analiza numerică ar fi fost continuată.

O clasificare a metodelor de predicționare a consumurilor de energie pentru clădiri, ținând cont de noile metode dezvoltate începând cu anii '90, este: metode ingineresti, metode bazate pe Inteligență Artificială și metode hibride [141]. Metodele hibride presupun utilizarea atât a metodelor ingineresti, cât și a metodelor bazate pe Inteligență Artificială, având posibilitatea să reducă din limitele fiecărui tip de metodă utilizată independent [126]. Metodele hibride se mai numesc și metode de tip “grey box”.

Deși determinarea cât mai exactă a consumurilor de energie în clădiri este scopul final al cercetărilor în acest domeniu, în vederea reducerii lor prin identificarea soluțiilor adecvate, în acest subcapitol focusul este îndreptat spre breșa de cunoștințe identificată în calculul pierderilor de căldură prin sol la clădiri de dimensiuni mari, ca parte componentă a bilanțului termic și, în final, a consumului de energie al clădirii.

În studiul întreprins în acest subcapitol se propune o abordare mixtă, în sensul utilizării valorilor fluxului termic orar pe suprafața plăcii rezultat prin simulări numerice în regim nestaționar pentru antrenarea rețelelelor neuronale, pentru predicționarea aferentă unei perioade îndelungate (20 ani) a valorilor de flux termic orar, fără a mai continua simularea numerică de la un pas de timp încolo.

Datele de intrare/ ieșire țintă sunt reprezentate de *valorile orare din fiecare an* (date de intrare) *ale fluxului termic* (date de ieșire țintă) pe suprafața plăcii determinate în cap. 4 pentru colțul unei plăci pe sol cu dimensiunea de 15x15 m (dimensiunea întregii plăci considerate fiind de 30x30 m), netermoizolată, inclusiv interacțiunea acesteia cu pereți din zidărie de cărămidă, pe o durată de patru ani. Această analiză numerică a fost efectuată pe durata a 8 ani, incluzând 7 sezoane de încălzire, în condițiile precizate în subcap. 5.2, în intervalul de timp 15 octombrie, anul 1 până în 15 aprilie, anul 8, considerând fiecare sezon de încălzire cuprins între 15 octombrie, anul curent, până în 15 aprilie, anul următor.

Rezultatele simulării numerice constau în 56952 de valori orare pentru fluxul termic integrat la suprafața plăcii pe sol, aferente intervalului de timp analizat. Dintre acestea, 17568 de valori au fost utilizate ca date de ieșire țintă pentru antrenarea rețelelelor neuronale în configurațiile propuse și reprezintă valorile fluxului termic pentru primele patru sezoane de

încălzire (15 octombrie, anul 1 - 15 aprilie, anul 5). Din cele 17568 seturi de valori numerice utilizate ca date de intrare/ieșire țintă, 85% au fost utilizate pentru antrenare, 5% au fost utilizate pentru validarea antrenării, iar 10% au fost utilizate pentru testarea rețelelor neuronale deja antrenate. Ca verificare suplimentară și fără să fie utilizate propriu-zis în antrenarea, validarea și testarea rețelelor neuronale propuse, celelalte rezultate aferente următoarelor sezoane de încălzire analizate numeric au fost utilizate ca și date de validare și testare a *predicțiilor* oferite de rețelele neuronale artificiale. O selecție din rezultatele numerice utilizate în antrenarea rețelelor neuronale sunt prezentate în Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Valori orare ale fluxului termic pe suprafața plăcii obținute prin simulări numerice

Anul 1		Anul 2		...	Anul 5		...	Anul 7		Anul 8	
Ora	Flux termic [W]	Ora	Flux termic [W]	...	Ora	Flux termic [W]	...	Ora	Flux termic [W]	Ora	Flux termic [W]
6889	897.38	7297	1038.82	...	745	1457.23	...	2161	1202.96	2511	1080.51
6890	897.41	7298	1038.15	...	746	1458.57	...	2162	1198.55	2512	1082.15
6891	897.44	7299	1038.59	...	747	1459.71	...	2163	1194.47	2513	1083.15
6892	897.45	7300	1040.04	...	748	1461.02	...	2164	1191.34	2514	1083.18
6893	897.45	7301	1042.09	...	749	1462.77	...	2165	1189.48	2515	1082.18
6894	897.47	7302	1044.29	...	750	1465.02	...	2166	1188.96	2516	1080.32
6895	897.55	7303	1046.17	...	751	1467.62	...	2167	1189.63	2517	1078.04
6896	897.67	7304	1047.35	...	752	1470.33	...	2168	1191.20	2518	1075.75
6897	897.82	7305	1047.58	...	753	1472.90	...	2169	1193.33	2519	1073.87

Se propun mai multe rețele neuronale artificiale, cu următoarea arhitectură de bază:

- Date de intrare (input data): ora i din anul j (vectorul date de intrare 1, cu valori cuprinse între 1 și 8760) și anul j (vectorul date de intrare 2, cu valori cuprinse între 1 și 5);
- Strat de neuroni 1 (ascuns);
- Strat de neuroni 2 (ascuns);
- Strat de ieșire (output data): valoarea orară a fluxului termic obținut, în prealabil, din analiza numerică utilizând metoda elementului finit (vectorul conține câte o valoare aferentă fiecărei combinații de valori ale datelor de intrare sau, mai concret, fiecărei ore i din anul j de analiză îi corespunde o valoare de flux termic). Numărul de valori ale fluxului termic orar este egal cu numărul seturilor de date de antrenare.

În ceea ce privește structura straturilor ascunse de neuroni, pentru a identifica numărul optim de neuroni de pe fiecare strat ascuns, s-au încercat mai multe combinații, astfel, pentru fiecare strat ascuns, s-au propus, pe rând: 5, 10, 15, 20, 25, 30 de neuroni, care au dus în final la antrenarea și analiza a 36 de arhitecturi de rețele neuronale artificiale (RNA) distincte.

Funcția de activare sau de transfer specifică neuronilor din straturile ascunse ale rețelelor neuronale este funcție sigmoidă tangentă hiperbolică, iar funcția de transfer de pe stratul de ieșire este liniară.

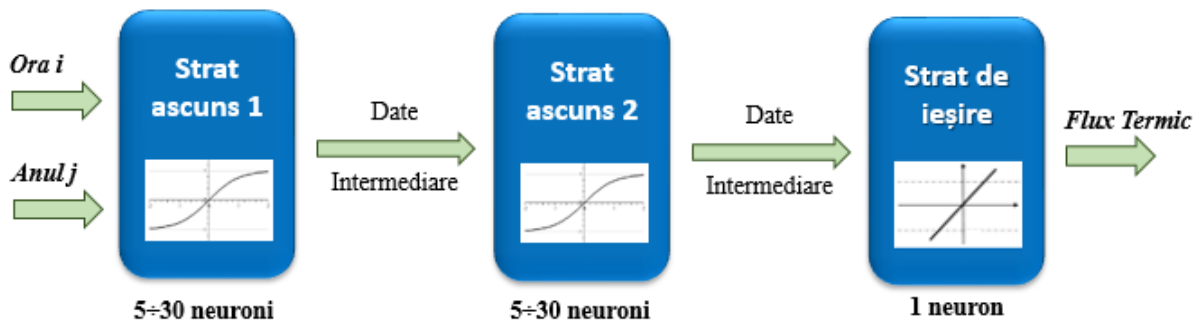


Fig. 5.2 Arhitectura rețelelor neuronale artificiale implementate cu 2 straturi ascunse/ 1 strat de ieșire

Toate rețelele neuronale analizate au fost antrenate utilizând un algoritm bazat pe o metodă optimizată de generalizare, denumită regularizarea Bayesiană, dezvoltată de MacKay [138], care determină regularizarea optimă a ponderilor și polarizărilor, amintită în subcap. 5.1.3.

Timpu de antrenare pentru o rețea neuronală artificială a fost, în medie, cam o oră. Ca să se facă o comparație, pentru același model studiat utilizând analiză numerică, pentru rezolvarea ecuațiilor termodinamice, se pot obține rezultate pentru o perioadă investigată de 24 h.

Utilizând rezultatele obținute prin analiza MEF pe ultimele trei sezoane de încălzire, s-au putut testa predicțiunile făcute de rețelele neuronale, astfel că fiecare valoare a fluxului orar obținut prin analiză MEF s-a comparat cu valoarea orară predicționată de către fiecare structură de rețea neuronală propusă. Pentru evaluarea performanței rețelelor și identificarea rețelei neuronale celei mai performante s-au determinat valori medii (*AvgErr*) și maxime (*MaxErr*) ale erorilor pentru valorile fluxului termic predicționat. Totodată, s-a determinat un coeficient de corelație între valorile obținute cu analiza numerică pentru cele șapte sezoane de încălzire și cele obținute de rețelele neuronale, atât în procesul de antrenare, validare, testare (patru sezoane), cât și pentru predicția pe următoarele trei sezoane, utilizând relația (5-3). R^2 reprezintă un indicator sintetic care exprimă cât de apropiată este relația dintre cele două variabile definite mai jos.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=0}^n (x_i \cdot y_i)] - \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=0}^n x_i) \cdot (\sum_{i=0}^n y_i)}{\sqrt{[\sum_{i=0}^n (x_i)^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=0}^n x_i)^2] \cdot [\sum_{i=0}^n (y_i)^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=0}^n y_i)^2]}} \quad (5-3)$$

unde:

x_i – variabila valorilor de flux termic orar obținute din analiză MEF;

y_i – variabila valorilor de flux termic orar furnizate de RNA.

Performanțele rețelelor neuronale artificiale studiate sunt centralizate în Tab. 5.2.

Tab. 5.2 Centralizatorul performanțelor rețelelor neuronale pentru valorile predicționate

HL1	HL2	5	10	15	20	25	30
5	AvgErr	1.49	0.74	17.52	47.45	0.37	0.36
	MaxErr	7.73	3.89	89.53	1649.32	1.67	1.80
	R ²	0.983	0.995	-2.449	-226.162	0.999	0.999
10	AvgErr	0.69	0.48	0.40	0.41	0.36	0.32
	MaxErr	4.08	2.79	2.10	1.79	2.45	1.55
	R ²	0.995	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999
15	AvgErr	248.11	2.64	32.62	0.77	0.38	0.31
	MaxErr	495.45	219.43	421.07	4.47	1.95	1.60
	R ²	-343.752	0.085	-36.824	0.995	0.999	0.999
20	AvgErr	2485.71	14.70	0.84	0.38	521.01	0.32
	MaxErr	9195.15	113.31	6.11	1.54	1773.01	1.60
	R ²	-50175.833	-4.379	0.994	0.999	-2219.865	0.999
25	AvgErr	2203.24	16.79	146.27	3.87	0.35	1.74
	MaxErr	8198.79	115.41	1796.95	150.80	1.83	23.93
	R ²	-24110.224	-2.146	-343.420	0.019	0.999	0.923
30	AvgErr	21.46	6.90	0.49	1.25	1.48	0.80
	MaxErr	274.50	45.14	2.86	12.57	11.78	5.44
	R ²	-3.925	0.372	0.998	0.982	0.979	0.994

Pe baza analizei performanței predicționărilor valorilor de flux termic orar obținute pentru sezoanele de încălzire 5, 6 și 7, s-a identificat rețeaua cu configurația 2-10-30-1 ca fiind cea mai bună RNA. Durata antrenării pentru această rețea (pe același calculator pe care s-au efectuat și analizele numerice MEF din cap. 4) a fost de 1 h 19 min 13 s.

Totodată, tot ca metodă de verificare a performanței rețelelor, a fost făcută o analiză de tip regresie post-antrenare între valorile predicționate de rețelele neuronale și valorile de flux termic corespunzător determinat prin analiză MEF (pentru cele șapte sezoane), pentru toate cele 36 de configurații analizate, în Fig. 5.3 fiind prezentate rezultatele analizei post-antrenare și de predicționare pentru cea mai bună rețea neuronală identificată (2-10-30-1).

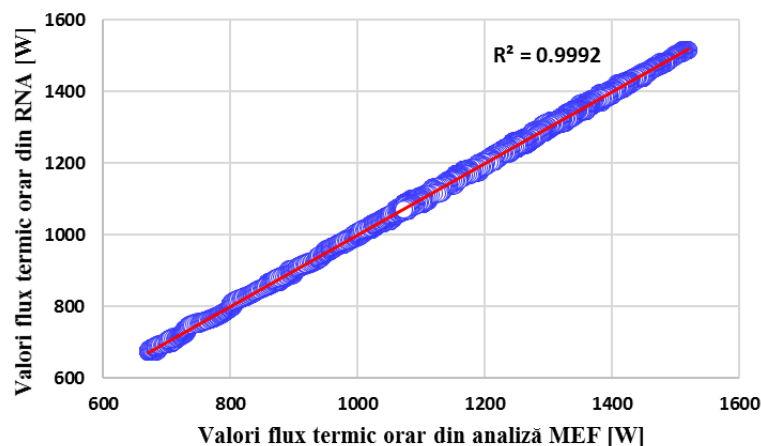


Fig. 5.3 Verificare performanță RNA: Regresie pentru rețeaua neuronală 2-10-30-1

În Fig. 5.4 este făcută o analiză a distribuției erorilor pentru fiecare valoare orară a fluxului termic, atât pentru valorile din seturile de antrenare, validare, testare (rezultatele primelor patru sezoane de încălzire), cât și pentru valorile predicționate din setul de testare suplimentară (ultimele trei sezoane de încălzire).

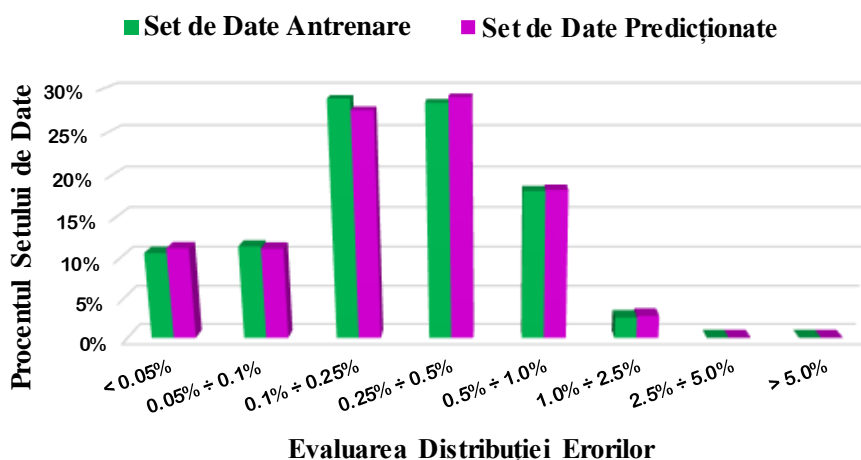


Fig. 5.4 Distribuția erorilor pentru seturile de valori pentru antrenare și pentru testare suplimentară a rețelelor neuronale

În final, predicționarea valorilor de flux termic orar a fost extinsă de la trei ani (ultimele trei sezoane de încălzire) la 20 de ani, cu o predicționare de lungă durată pentru cea mai bună configurație obținută (2-10-30-1). În Fig. 5.5 se prezintă predicția de lungă durată a pierderilor de căldură a colțului bisimetric al plăcii pe sol de dimensiune 30x30 m, perioada de 20 de ani.

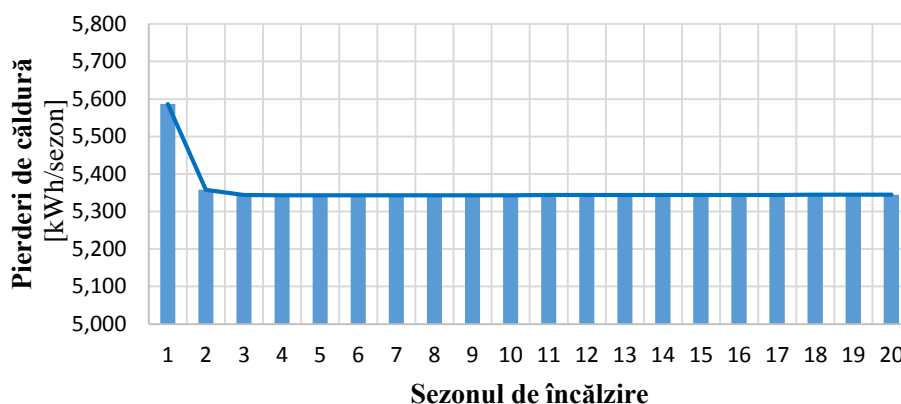


Fig. 5.5 Predicționare de lungă durată a pierderilor de căldură a colțului plăcii pe sol de dimensiune 30x30 m

Pe lângă configurația rețelei neuronale artificiale 2-10-30-1, identificată ca fiind cea mai bună, încă 15 configurații de rețele au o eroare maximă de sub 5% (între 1.54% ÷ 4.47%) și o eroare medie sub 1% (între 0.31% ÷ 0.77%), între valorile predicționate de rețele și rezultatele obținute prin analiză numerică MEF. Acestea sunt marcate cu **bold** în Tab. 5.2. Totodată, pentru aceste configurații s-a obținut un factor de corelare foarte bun (între 0.995 ÷ 0.999), ceea ce indică o relație puternică între răspunsul rețelelor neuronale și valorile numerice corespondente din analiza numerică. Toți acești indicatori validează rezultatele predicționate de rețelele neuronale.

Performanța rețelelor neuronale de a predicționa cu erori foarte mici, atât datele de ieșire corespondente aferente datelor de intrare din etapa de antrenare, cât și datele de ieșire

corespondente unor noi date de intrare, care reprezintă de fapt predicția dorită, înseamnă o bună generalizare a rețelei neuronale implementate.

Modelarea numerică continuată cu o aplicație în Inteligență Artificială reprezintă o *metodă hibridă* care se poate utiliza în studiul comprehensiv al transferului de flux termic la plăci pe sol de dimensiuni mari, pentru perioade investigate lungi de timp, subiectul fiind aplicabil unor clădiri, de regulă, din sectorul nerezidențial și are scopul principal de a reduce resursele computaționale semnificative necesare pentru o asemenea problematică studiată: timp de simulare și memorie de stocaj.

Producerea unui *profil caracteristic* (“*pattern*”) modelului analizat, prin rezolvarea numerică a ecuațiilor caracteristice transferului de căldură, cu substituirea de la un anumit pas de timp a acestora cu o aplicație mult mai rapidă în Inteligență Artificială, care rezolvă o problemă de tip *recunoașterea profilului* („*pattern recognition*”), și predicționează valorile orare ale fluxului termic de la acel pas de timp până unde se dorește, constituie o contribuție originală vis-à-vis de metodele de cercetare aplicabile acestui subiect, de altfel destul de evitat utilizând metodele tradiționale convenționale, datorită limitelor deja menționate. Aplicația propusă substituie *parțial* rezolvarea ecuațiilor termodinamice ce caracterizează transferul de căldură în interacțiunea clădire - sol.

O asemenea abordare poate fi folosită pentru identificarea efectului pe termen lung a soluțiilor tehnice optime de reducere a consumului de energie prin elementul anvelopei clădirii de tip placă pe sol, pentru clădirile de dimensiuni mari, dintr-o perspectivă fenomenologică fizică mai largă.

Astfel, în acest subcapitol s-a dezvoltat o metodă comprehensivă hibridă, care permite studiul termotehnic de lungă durată al interacțiunii cu solul pentru clădirile de dimensiuni mari, metodă care face această tematică mai accesibilă pentru cercetători și ingineri.

Se face precizarea că cercetarea întreprinsă în cadrul acestui subcapitol și rezultatele obținute au fost diseminate în mediul academic prin publicarea în cadrul conferinței internaționale *Interdisciplinarity in Engineering INTER-ENG 2018, Tg. Mureș, Romania* în articolul [140].

5.3 Aplicația 2 în AI implementată printr-o metodă de tip “black box”

Tot pe baza rezultatelor numerice obținute în cap. 4, în acest subcapitol se propune o a doua aplicație utilizând Inteligența Artificială. Astfel, se utilizează valorile fluxului termic orar obținut pentru plăcile pe sol în parametrizările efectuate în subcap. 4.3 ca date de intrare/ieșire țintă pentru antrenarea unor rețele neuronale artificiale care să *substituie total rezolvarea ecuațiilor termodinamice* pentru o dimensiune distinctă a plăcii pe sol.

Mai concret, se propune utilizarea rezultatelor din modelele numerice obținute prin aplicarea modelului similă la scara 1:10, extrapolate la scara 1:1, pentru dimensiunile de plăci pe sol: 30x30 m, 50x50 m, 70x70 m, 100x100 m, urmărindu-se predicționarea rezultatelor pentru dimensiunea plăcii pe sol de 60x60 m, fără ca rezultatele obținute prin analiză MEF ale acesteia să fie utilizate în procesul de antrenare a rețelelor neuronale. Se face precizarea că analiza se face pentru rezultatele numerice obținute la nivel de colț bisimetric al plăcii pe sol.

Astfel, din rezultatele obținute în analiza MEF, în RNA se utilizează 4 x 17568 de valori ale fluxului termic orar aferente primelor 4 sezoane de încălzire obținute cu metode numerice, pentru cele 4 dimensiuni de plăci utilizate pentru *antrenarea, validarea și testarea* rețelelor neuronale. Procentele de împărțire a seturilor de date se păstrează ca și la aplicația propusă în subcap. 5.2: 85% pentru antrenare, 5% pentru validare și 10% pentru testarea rețelelor neuronale deja antrenate.

Pentru testarea suplimentară a valorilor orare de flux termic *predicționat* pentru colțul aferent plăcii de dimensiune 60x60 m, se utilizează încă 17568 de valori obținute în analiza numerică, acestea nefiind utilizate deloc în procesul de antrenare al rețelelor.

Arhitectura propusă pentru rețelele neuronale din această aplicație este următoarea:

- 4 intrări distincte ca date de intrare (input data): dimensiunea 1 a plăcii pe sol (L_{1e}), dimensiunea 2 a plăcii pe sol (L_{2e}), ora i din anul j (cu valori între 1 și 8760), anul j (cu valori între 1 și 5);
- 2 straturi ascunse de neuroni, cu următoarele combinații ca număr de neuroni pe stratul 1 ascuns, respectiv pe stratul 2 ascuns: 5-20, 10-25, 15-20, 36-9;
- 1 strat de ieșire: valoarea orară a fluxului termic obținut, în prealabil, prin analiza MEF (vectorul conține câte o valoare aferentă fiecărui set de date aferent datelor de intrare sau, mai concret, fiecărei dimensiuni L_{1e} și L_{2e} , pentru fiecare oră i din anul j de analiză, îi corespunde o valoare de flux termic).

Cu această arhitectură se obțin patru rețele neuronale distincte, pe care s-au aplicat funcții de transfer de tip sigmoidă tangentă hiperbolică pentru straturile ascunse de neuroni și funcția liniară pentru stratul de ieșire.

Se face precizarea că în configurația 4-36-9-1 numărul de neuroni din cele două straturi ascunse s-a determinat prin aplicarea relațiilor bazate pe teorema lui Kolmogorov, menționate în subcap. 5.1.2.

Pentru antrenarea, validarea și testarea rețelelor neuronale din aplicația propusă s-au încercat mai mulți algoritmi, disponibili în MATLAB, în Neural Network Toolbox (*nntool*) [130], care în funcție de metoda de optimizare numerică de bază utilizată pot fi grupați în:

Algoritmi de antrenare rețea neuronală prin propagare înapoi care utilizează gradientul:

Algoritmi de gradient descrescător:

- *traingd* – Algoritmul gradientului descrescător cu propagare înapoi de bază;
- *traingda* – Algoritmul gradientului descrescător cu propagare înapoi adaptativă lr;
- *traingdm* – Algoritmul gradientului descrescător cu moment;
- *traingdx* – Algoritmul gradientului descrescător cu moment cu propagare înapoi adaptativă lr;

Algoritmi de gradient conjugat:

- *traincgb* – Algoritmul gradientului conjugat cu actualizare (“restarts”) Powell – Beale;
- *traincgf* - Algoritmul gradientului conjugat cu actualizări Fletcher - Reeves;
- *traincgp* - Algoritmul gradientului conjugat cu actualizări Polak - Ribiere;
- *traincsg* – Algoritmul gradientului conjugat scalat.

Algoritmi cu metode cvasi-Newton:

- *trainbfg* – Algoritm BFGS cvasi-Newton cu propagare înapoi de bază;

Alți algoritmi:

- *trainoss* – Propagare înapoi “one step seccant”;
- *trainrp* – Propagare înapoi RPROP („resilient backpropagation”);

Algoritmi de antrenare prin propagare înapoi care utilizează Jacobianul:

- *trainbr* – Algoritm regularizării Bayesiene;
- *trainlm* – Algoritm Levenberg – Marquardt.

Scopul utilizării mai multor algoritmi de antrenare a fost de a identifica care sunt cei potriviți specificului datelor de intrare/ieșire țintă pentru această aplicație în inginerie civilă. Prin utilizarea a 13 algoritmi de învățare pentru arhitecturile propuse, se testează performanța a 52 de rețele neuronale artificiale distincte.

După obținerea unui prim set de rezultate pentru RNA propuse, s-au încercat și câteva tehnici de optimizare. Astfel, s-au testat variații ale unor tehnici de antrenare ca *oprirea timpurie*. Oprirea timpurie reprezintă oprirea antrenării în cazul în care erorile rețelei cresc după un număr de iterații, iar ponderile și polarizările se aduc la valoarea la care erau când s-a obținut minimumul erorii pentru datele de validare ale RNA în curs de antrenare [130].

De asemenea, s-a testat influența valorilor numerice din vectorul date de ieșire țintă, prin scalarea la scara 1:10 și 1:100 a rezultatelor de flux termic orar. Această testare s-a efectuat ca urmare a alegerii funcțiilor de transfer pentru neuronii de pe straturile ascunse ale rețelei neuronale, de tip sigmoidă tangență hiperbolică, care forțează ca toate valorile numerice aferente datelor de intrare, după ce sunt ajustate prin ponderi și polarizări, să fie mapate pentru intervalul [-1,1] la ieșirea din neuron.

Astfel, cele patru structuri de rețele neuronale s-au antrenat pe rând cu cei 13 algoritmi de antrenare utilizați, în anumite condiții, grupate în patru cazuri distincte. Rezultatele reprezintă performanța rețelelor neuronale pentru această aplicație și s-au centralizat sub formă de eroare medie și eroare maximă a valorilor de flux termic rezultate din analiză numerică MEF (date de ieșire țintă) față de datele de ieșire din rețelele neuronale antrenate, respectiv timpul necesar antrenării fiecărei configurații de rețea în Tab. 5.3.

Cele patru cazuri analizate se diferențiază prin următoarele condiții impuse procesului de antrenare, respectiv datelor numerice din vectorul datelor de ieșire țintă:

- CAZ A: Oprește după 100 de *verificări corespunzătoare setului de date de validare (verificări ale erorilor din setul de validare față de o eroare minimă, iar în cazul în care acestea cresc față de eroarea minimă identificată antrenarea se oprește, valorile ponderilor și polarizărilor fiind utilizate cele de la momentul atingerii minimumului erorii)*, scalare date de ieșire țintă față de rezultatele din modelul numeric scara 1:1;
- CAZ B: Oprește timpurie după 30 de *verificări corespunzătoare setului de date de validare*, scalare date de ieșire țintă față de rezultatele din modelul numeric scara 1:1;

- CAZ C: Oprește după 100 de verificări corespunzătoare setului de date de validare, scalare date de ieșire țintă față de rezultatele din modelul numeric scara 1:10;
- CAZ D: Oprește după 100 de verificări corespunzătoare setului de date de validare, scalare date de ieșire țintă față de rezultatele din modelul numeric scara 1:100.

Tab. 5.3 Rezultate performanță rețele neuronale analizate pentru Aplicația 2

Algoritm antrenare	Configurație RNA	CAZ A			CAZ B			CAZ C			CAZ D		
		AvgErr	MaxErr	Timp	AvgErr	Max Err	Timp	AvgErr	MaxErr	Timp	AvgErr	MaxErr	Timp
		[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]
trainoss	4-5-20-1	22.49	43.57	1217.7	13.20	55.43	556.51	10	43.69	1273.4	1.63	6.61	558.66
trainoss	4-10-25-1	27.25	81.98	1850.9	7.00	18.19	2665.1	20.17	48.13	2012	27.16	80.36	1645.3
trainoss	4-15-20-1	16.82	73.12	7840.7	14.51	63.45	834.75	20.91	80.48	2281	6.25	15.54	1213.5
trainoss	4-36-9-1	10.57	30.5	1178.6	8.47	26.92	1680.7	4.73	13.74	2140.2	9.82	43.65	1170.6
trainrp	4-5-20-1	7.98	17.98	474.33	14.69	42.10	476.38	13.49	40.38	480.38	7.61	23.53	2175.5
trainrp	4-10-25-1	10.51	20.9	572.97	6.65	16.00	572.76	24	75.37	572.21	15.37	63.55	475.43
trainrp	4-15-20-1	14.08	40.71	591.93	11.30	44.98	343.15	15.51	41.74	594.2	18.74	52.86	574.52
trainrp	4-36-9-1	26.26	117.25	622.07	21.31	102.24	628.07	16.23	43.18	621.77	11.95	58.97	596.77
trainlm	4-5-20-1	16.08	47.46	793.7	0.55	2.44	4139.8	1012.8	2675.8	4829.4	199.05	730.78	4152.6
trainlm	4-10-25-1	348.53	1411.6	7523.3	96.36	193.03	2946.9	944.47	3756	7341.8	143.32	481.26	7295.8
trainlm	4-15-20-1	428.51	1164.5	3383.2	660.33	1497.4	7971.6	144.22	548.11	7902.9	55.24	325.26	2980.8
trainlm	4-36-9-1	120.08	447.29	4969	2050.6	4950	1235.7	543.31	2247.9	12415	613.02	2381.3	12301
trainbfg	4-5-20-1	12.05	36.18	4069	6.39	27.03	3861.3	4.15	14.44	2586.4	80.47	373.34	784.92
trainbfg	4-10-25-1	12.32	59.07	5048.7	6.39	37.59	4820.1	12.42	36.31	3161.1	10.9	26.83	605.46
trainbfg	4-15-20-1	7.84	41.68	4906.3	9.63	26.35	4873.8	10.59	40.42	3214.6	26.32	76.05	1439.7
trainbfg	4-36-9-1	12.68	33	5406	6.68	21.25	5392.6	5.41	41.13	3710.7	41.02	102.84	1850.6
traincgb	4-5-20-1	77.95	96.83	465.96	11.39	21.52	237.18	3.15	15.47	443.41	17.84	53.81	441.71
traincgb	4-10-25-1	19.67	72.52	392.32	8.2	41.36	628.9	19.65	57.11	1062	6.86	18.88	804.59
traincgb	4-15-20-1	14.59	73.14	392.32	34.99	92.82	539.79	22.96	80.66	553.54	10.49	34.63	1094.3
traincgb	4-36-9-1	13.39	33.57	315.55	24.75	61.09	422.77	11.16	34.69	811.62	31.21	96.43	1594.6
traincgf	4-5-20-1	2.31	10.03	583.82	2.55	14.39	372.08	2.19	10.83	371.44	29.14	53.42	761.14

Capitol 5 Aplicarea tehnicilor de Inteligență Artificială în studiul transferului de căldură la plăci pe sol de dimensiuni mari

traincgf	4-10-25-1	8.39	37.42	619.29	2.48	10.19	447.27	19.37	56.31	444.80	7.31	18.35	444.11
traincgf	4-15-20-1	22.21	59.79	350.47	5.9	36.77	407.82	8.76	26.03	359.27	12.91	33.15	354.35
traincgf	4-36-9-1	24.59	62.95	486.41	13.11	44.99	475.69	7.80	43.29	754.03	24.96	49.65	1999.6
traincgp	4-5-20-1	2.49	13.52	237.6	5.01	21.1	589.43	2.53	10.21	363.30	11.28	33.28	179.24
traincgp	4-10-25-1	19.07	91.99	298.3	5.19	33.02	211.67	9.21	19.92	452.55	13.75	43.88	596.49
traincgp	4-15-20-1	5.38	25.23	362.08	8.12	31.68	2684.4	8.78	32.06	362.94	4.37	18.81	2713.6
traincgp	4-36-9-1	12.07	29.2	809.18	7.95	23.22	364.6	10.97	34.55	591.96	9.08	36.57	2955.7
traingd	4-5-20-1	229.07	419.87	3.65	94.87	222.55	3.76	471.97	733.92	11.66	20.8	100.91	471.65
traingd	4-10-25-1	116.76	315.33	4.63	163.11	343.33	4.69	449.02	1043.80	13.30	11.03	44.01	567.73
traingd	4-15-20-1	301.99	682.6	4.77	117.77	284.29	4.72	368.37	768.11	14.95	16.71	47.84	586.45
traingd	4-36-9-1	259.71	370.39	5.86	80.61	313.31	5.76	112.83	342.39	17.94	12.21	70.38	616.76
traingda	4-5-20-1	9.16	29.47	472.68	9.86	72.99	101.64	12.4	50.59	211.88	18.44	77.68	472.3
traingda	4-10-25-1	14.5	32.6	489.45	6.63	28.75	177.35	7.03	18.42	565.21	7.55	21.78	566.43
traingda	4-15-20-1	16.63	78.01	587.24	11.95	67.55	73.33	12.35	40.45	592.18	8.9	33.65	585.04
traingda	4-36-9-1	8.18	31.04	614.63	9.24	41.98	142.69	7.37	41.4	490	6.37	19.3	613.31
traingdm	4-5-20-1	187.86	329.48	4.26	301.11	588.09	4.45	155.65	381.72	13.05	15.28	66	473.38
traingdm	4-10-25-1	127.94	252.69	4.26	49.83	134.27	5.54	109.02	410.87	18.5	13.83	61.92	567.91
traingdm	4-15-20-1	71.82	157.14	5.56	209.02	454.95	5.43	161.82	290.71	19.24	21.6	61.91	580.82
traingdm	4-36-9-1	166.03	282.49	6.72	181.89	327.91	6.81	116.18	390.9	21.52	9.5	47.4	615.6
trainscg	4-5-20-1	2.64	15.73	161.03	20.11	69.17	181.54	12.74	32.07	340.82	47.07	71.58	642.9
trainscg	4-10-25-1	11.13	40.37	378.52	7.42	20.61	197.16	8.27	28.57	835.71	20.97	71.93	1042.7
trainscg	4-15-20-1	6.47	22.25	380.41	9.76	32.07	202.05	10.07	24.99	507.37	3.43	13.72	1069.4
trainscg	4-36-9-1	11.58	27.28	324.63	7.82	25.36	418.21	14.58	56.98	1065.4	15.16	37.76	404.58
trainbr	4-5-20-1	0.44	2.43	4298.1	0.51	2.66	4282.5	0.43	1.96	4264.4	0.5	2.86	4273.7
trainbr	4-10-25-1	0.29	1.48	6497.7	0.28	1.45	6519.5	0.38	3.1	6493.6	0.35	2.7	6517.5
trainbr	4-15-20-1	0.37	2.07	7025.6	72.95	359.44	7020.5	0.48	2.09	6994.5	0.33	1.49	7001.4

trainbr	4-36-9-1	59.71	238.28	11248	89.15	494.06	11177	15.4	64.34	11178	5.31	10.17	11208
traingdx	4-5-20-1	7.76	29.69	440.32	3.44	23.19	444.19	5.07	36.57	441.22	5.97	22	440.75
traingdx	4-10-25-1	16.83	62.14	527.63	6.3	25.2	531.51	11.9	44.03	531.13	4.75	23.53	530.63
traingdx	4-15-20-1	8.83	44.97	552.84	8.27	27.03	557.49	5.95	21.17	554.02	10.56	33.83	551.76
traingdx	4-36-9-1	8.22	33.96	508.12	9.05	25.89	579.76	14.35	39.39	582.45	8.49	23.69	581.7

Tab. 5.4 Centralizator cu performanțele rețelei neuronale de referință pe cele cinci calculatoare utilizate

RNA de referință 4-30-30-1	CAZ A			CAZ B			CAZ C			CAZ D		
	AvgErr	MaxErr	Timp antrenare	AvgErr	MaxErr	Timp antrenare	AvgErr	MaxErr	Timp antrenare	AvgErr	MaxErr	Timp antrenare
	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]	[%]	[%]	[s]
Calculator 1	1.62	5.7	556.77	1.66	5.58	556.59	1.72	11.98	549.98	1.63	6.61	558.66
Calculator 2	1.93	9.82	545.6	2.01	10.36	547.9	1.66	5.67	544.57	1.94	8.07	545.93
Calculator 3	1.93	9.81	546.79	2.01	10.36	555.29	1.67	7.64	544.41	1.94	8.07	540.24
Calculator 4	1.63	5.7	550.54	2.01	10.36	546.23	2.1	8.7	554.77	1.63	6.61	549.8
Calculator 5	1.6	5.73	466.33	2.05	8.07	465.1	1.65	5.66	468.36	1.65	5.74	458.82

Tab. 5.5 Caracteristici calculatoare utilizate pentru Aplicația 2

Calculator 1	Intel(R) Core(TM) i5-4460, 3.20GHz, 4.00 GB RAM
Calculator 2	Intel(R) Core(TM) i5-4460, 3.20GHz, 4.00 GB RAM
Calculator 3	Intel(R) Core(TM) i5-4460, 3.20GHz, 4.00 GB RAM
Calculator 4	Intel(R) Core(TM) i5-4460, 3.20GHz, 4.00 GB RAM
Calculator 5	Intel(R) Core(TM) i5-4590, 3.30GHz, 4.00 GB RAM

Din rezultatele obținute se identifică cea mai bună rețea neuronală dintre RNA testate, aceasta fiind: 4-10-25-1, antrenată cu algoritmul de regularizare Bayesiană a ponderilor și polarizărilor, același care a oferit o generalizare bună pentru RNA propuse în aplicația din subcap. 5.2. O altă configurație cu rezultate bune este: 4-5-20-1, pentru toate cazurile analizate, respectiv RNA 4-15-20-1, însă cu performanțe foarte bune doar pentru cazurile A, C și D.

Pe baza rezultatelor obținute în această aplicație se observă și faptul că acest algoritm antrenează rețele neuronale care permit generalizări cu rezultate stabile, față de alți algoritmi care au dat rezultate bune pentru o configurație, de ex. algoritmul Levenberg - Marquardt pentru configurația RNA 4-5-20-1 în Cazul B, însă cu rezultate nefavorabile pentru celelalte cazuri analizate.

Stabilitatea algoritmului de regularizare Bayesiană se poate observa și în rețeaua neuronală de referință cu structura 4-30-30-1 care a fost utilizată pe toate cele cinci calculatoare pe care s-au efectuat antrenările și predicționările pentru toate cele 52 de rețele analizate (vezi Tab. 5.4). Se face precizarea că pentru rețeaua neuronală de referință, numărul de iterații pentru care s-a parcurs rețeaua pe fiecare calculator este de 100 de iterații, ceea ce poate fi o explicație pentru erorile medii și maxime relativ mari obținute ale celor cinci rețele, însă rolul acesteia a fost altul, de a identifica dacă performanța computerului utilizat are vreo influență asupra timpului de antrenare al rețelelor neuronale.

O altă observație pe baza rezultatelor obținute, care are un caracter mai general, este că s-au identificat algoritmi de antrenare sensibili la ordinul de mărime al valorilor numerice de pe vectorii date de ieșire țintă. De exemplu, în Cazul A și Cazul D rețelele neuronale sunt antrenate cu funcții de antrenare de gradient descrescător - *traingd*, *traingdm*, iar erorile rețelelor scad mult în Cazul D față de Cazul A, adică pentru valori numerice cu ordin de mărime mic, algoritmi sunt mai eficienți. Totuși, se face precizarea că erorile obținute rămân semnificative.

Modelarea numerică substituită printr-o aplicație în Inteligență Artificială reprezintă o metodă de tip “black box” care se poate utiliza în studiul comprehensiv al transferului de flux termic la plăci pe sol de dimensiuni mari, pentru perioade investigate lungi de timp, iar scopul principal, la fel ca în cazul primei aplicații este de a reduce resursele computaționale semnificative necesare problematicii studiate: timp de simulare și memorie de stocaj.

Problema rezolvată prin aplicația propusă în acest subcapitol este una de tip *aproximare de funcție* (“*function approximation*”), datele de intrare aferente fiecărui set de date de antrenare fiind variabile independente (variabile “explicative”, asociate fiecărui răspuns distinct: temporale și dimensionale), iar datele țintă de ieșire fiind variabile dependente (variabile răspuns: valorile de flux termic). Așa cum se poate remarca în rezultatele obținute în subcap. 4.3.4 și în subcap. 4.3.5 (Fig. 4.22, Fig. 4.24, Fig. 4.25, Fig. 4.26 și Fig. 4.27), conexiunea între variabilele independente și variabilele dependente este neliniară. RNA rezolvă o problemă de tip aproximare de funcție neliniară, care să identifice conexiunea între variabilele explicative și variabilele dependente, pentru ca ulterior rețeaua neuronală să poată generaliza.

Generalizarea în sine este spectaculoasă, această aplicație permițând practic obținerea de valori de flux termic orar corecte pentru intervale semnificative de timp, aferente rezolvării

legii lui Fourier și a ecuației căldurii în regim nestaționar fără surse de căldură, fără ca acestea să fie rezolvate.

Fundamentarea ideii prin care rezultatele valorilor de flux termic orar pentru mai multe dimensiuni obținute prin analiză numerică să reprezinte variabile explicative și variabile răspuns pentru RNA, care să permită, prin generalizare, determinarea pentru intervale lungi de timp a răspunsului termic pentru o dimensiune a plăcii pe sol, distinctă față de dimensiunile ale căror valori ale fluxului termic au fost utilizate pentru antrenarea rețelelor neuronale, prin această aplicație în Inteligență Artificială, constituie o altă *contribuție originală* vis-à-vis de metodele de cercetare aplicabile acestei tematici caracteristice termotehnicii construcțiilor. Aplicația propusă în acest subcapitol substituie *total* rezolvarea ecuațiilor termo-dinamice ce caracterizează transferul de căldură în interacțiunea clădire - sol.

O asemenea aplicație poate fi utilă cercetătorilor, ca bază de lucru, pentru creșterea vitezei elaborării studiilor comprehensive pe această tematică, studii care să permită elaborarea ulterioară de metode analitice relativ facile pentru ingineri.

Astfel, în acest subcapitol s-a dezvoltat o metodă de tip “black box”, care permite studiul termotehnic comprehensiv de lungă durată al interacțiunii cu solul pentru clădirile de dimensiuni mari, metodă care face această tematică mai accesibilă pentru cercetători și ingineri.

5.4 Contribuții și concluzii

Principalele contribuții aduse prin acest capitol al tezei constau în introducerea *Inteligenței Artificiale* într-un domeniu din ingineria civilă (termotehnica construcțiilor) în care nu există abordări de acest tip.

S-a propus o soluție inovativă de utilizare a unor metode specifice Inteligenței Artificiale, într-un domeniu specific exclusiv cercetării la ora actuală în România, și anume metode numerice aplicate în transferul de căldură, în regim nestaționar de lungă durată, în studiul interacțiunii clădire – sol, pe modele tridimensionale, propunând astfel o schimbare de paradigmă în acest domeniu, soluție concretizată prin fundamentarea și elaborarea a două aplicații:

Aplicația 1

- S-au propus și testat 36 de configurații distincte de rețele neuronale artificiale;
- Are ca scop optimizarea (reducerea) resurselor, timp și memorie computațională, necesare studiului comprehensiv de lungă durată a transferului de flux termic în interacțiunea clădire - sol, prin predicționarea valorilor de flux termic pe o placă pe sol, cu pas orar, pe perioade mari de timp, în anumite condiții;
- Continuarea analizei numerice cu această aplicație în Inteligență Artificială permite *substituirea parțială a ecuațiilor termo-dinamice* care caracterizează procesul și reprezintă o **metodă hibridă, de tip “grey box”**.

Aplicația 2

- S-au propus și testat 52 de rețele neuronale artificiale (patru configurații distincte, utilizând 13 algoritmi de antrenare);

- Permite determinarea pierderilor de căldură orare ale unei plăci pe sol pentru o dimensiune distinctă (60x60 m), adică a răspunsul termic al clădirii în interacțiunea cu mediul înconjurător și cu solul, în urma învățării răspunsurilor de la alte dimensiuni de plăci pe sol (30x30 m, 50x50 m, 70x70 m, 100x100 m);
- Această aplicație în Inteligență Artificială permite *substituirea totală a ecuațiilor termodinamice* pentru o dimensiune distinctă a plăcii pe sol, prin predicționarea fluxurilor termice orare pe durate lungi de timp (mai multe sezoane de încălzire), pe baza unor parametrizări de dimensiuni în modele elaborate cu metode numerice, și reprezintă o **metodă de tip “black-box”**.

O asemenea abordare se adresează în primul rând cercetătorilor, pentru că prin studii comprehensive se poate ajunge la metode analitice simplificate, care să reprezinte un instrument de calcul facil pentru ingineri, în special pentru specialiștii auditori energetici, dar în egală măsură se adresează și inginerilor, având în vedere contextul actual și eforturile internaționale tot mai accelerate făcute cu scopul reducerii dramatice a consumurilor de energie, noi concepte de proiectare energetică fiind deja introduse, cum este conceptul NZEB (Nearly Zero Energy Building) sau clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero, unde gradul de detaliere și acuratețe al modelelor analizate de către ingineri va trebui să crească semnificativ pentru a se atinge indicatorii țintă specifici conceptului, indicatori care ulterior vor fi monitorizați în clădirile reale.

Capitol 6 Studii de caz de implementare concept NZEB în fondul construit existent în sectorul nerezidențial

6.1 Conceptul NZEB, ca soluție în contextul european al economiei de energie în clădiri

Prin acest capitol se continuă temei de cercetare în domeniul eficienței energetice a clădirilor din sectorul nerezidențial din perspectiva implementării conceptului NZEB (Nearly Zero Energy Buildings) în clădiri nerezidențiale existente, printr-o abordare integrată, utilizând analiza de tipul: de la particular la general sau pornind de la studii de caz cu scopul identificării unor observații cu caracter general specifice temei.

La nivelul anului 2010, stocul de clădiri din sectorul nerezidențial din România ocupa o suprafață de 62,515,000 m² (estimat) [7], [142]. O defalcare a tipurilor de clădiri din sectorul nerezidențial a fost făcută în [142], în funcție de destinația clădirilor și este prezentată în Fig. 6.1.

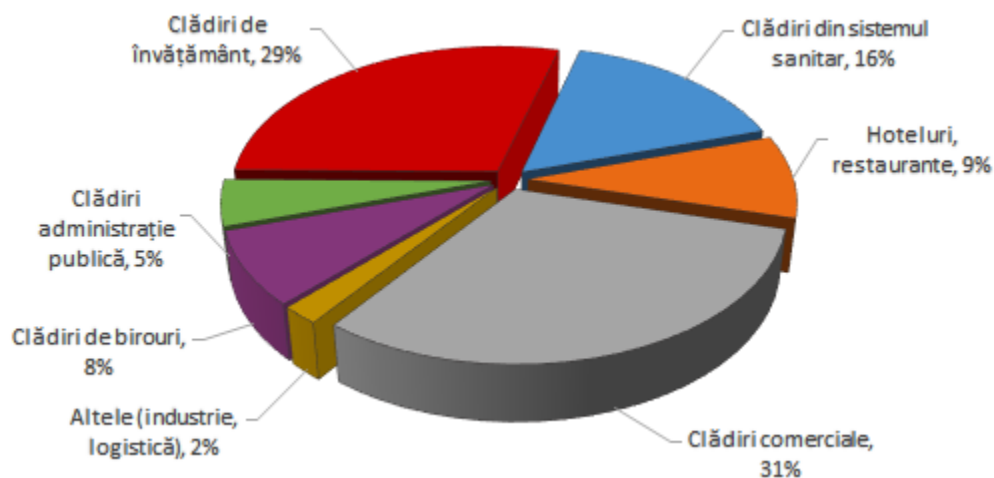


Fig. 6.1 Structura fondului de clădiri existent din sectorul nerezidențial în România [142]

Așa cum se observă în graficul de mai sus, procentul clădirilor industriale este cel mai mic, de 2%. Având în vedere că aplicabilitatea rezultatelor unei cercetări integrate extinsă pe acest domeniu este relativ redusă, s-a considerat oportună și utilă continuarea studiilor întreprinse în această teză, prin aplicarea metodologiei evaluării performanței energetice la nivel de clădire și pentru alte tipuri de clădiri din sectorul nerezidențial decât cele de tip industrial, concomitent cu implementarea conceptului NZEB la nivel de clădire.

Ca și definiție a acestui concept, în Directiva Europeană a Performanței Energetice a Clădirilor 2010/31/EU [143], *clădirea cu consum de energie aproape egal cu zero* este definită ca fiind clădirea cu o performanță energetică foarte ridicată, a cărei *cerință de energie* (“energy required”) din surse convenționale este aproape egal cu zero sau foarte scăzută, și care este acoperită într-o mare proporție din surse regenerabile, incluzând energie regenerabilă generată

local. În transpunerea directivei în legislația românească, în 2016, prin Legea 372/2005, actualizată [22], procentul de energie din surse regenerabile a fost stabilit la valoarea de minim 10% din *consumul de energie* al clădirii.

De asemenea, tot ca urmare a transunerii acestei directive, la nivel național s-a elaborat un document-cadru [31], suport pentru implementarea conceptului în reglementările tehnice naționale, unde sunt precizate valori ale nivelului maxim impus pentru energia primară din surse convenționale, precum și ale emisiilor de CO₂ pentru clădirile din sectorul rezidențial și pentru anumite tipuri de clădiri din sectorul nerezidențial, valori preluate ulterior în reglementarea tehnică C107/3-2005, actualizată în 2016 [32]. Acest document-cadru conține și alte prescripții, însă ele nu au fost preluate în reglementările tehnice aflate în vigoare, astfel că conceptul NZEB rămâne încă unul neclar, vis-à-vis de implementarea în practica curentă de proiectare și execuție a clădirilor.

Eforturi de promovare și implementare a conceptului, respectiv de pregătire a actorilor relevanți pe piață, au fost făcute printr-o serie de proiecte finanțate de către Comisia Europeană (proiecte de tip HORIZON 2020, IEE) dezvoltate în cadrul unor consorții internaționale, din care România a făcut, respectiv face parte, fiind reprezentată prin universități, institute de cercetare sau agenții de management energetic, cum sunt proiectele [144]:

- MEnS (Meeting of Energy Professional Skills) [145], [146], reprezentat prin Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, desfășurat în perioada 2015-2017, în cadrul căruia s-au organizat cursuri postuniversitare cu caracter multidisciplinar, cu focusul spre proiectarea integrată a clădirilor cu consum de energie aproape egal cu zero;
- Train-to-NZEB (2015-2018) [147], [148], Fit-to-NZEB [149], [150], reprezentate în cadrul consorțiilor internaționale prin INCD URBAN-INCERC București, în cadrul cărora s-au fundamentat scheme-cadru pentru dezvoltarea competențelor și a calificărilor pentru lucrătorii din construcții și a specialiștilor, inclusiv a formatorilor (“trainers”) pentru proiectarea și execuția NZEB;
- RepublicZeb [151], în cadrul căruia s-au dezvoltat strategii pentru implementarea NZEB în clădirile publice;
- neZEH [152], [153], reprezentat prin ABMEE (Agenția pentru Managementul Energiei și Protecția Mediului Brașov), în care s-au elaborat proiecte-pilot de transformare hoteluri existente în clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero.

Autoarea a fost implicată în unele dintre aceste proiecte: fie ca participant la sesiunile de formare de tip „Train-the-Trainer” (Train-to-NZEB), fie ca și specialist în elaborarea proiectelor-pilot din România (neZEH), fie ca și lector invitat (MEnS).

S-au întreprins studii privitor la ceea ce presupune implementarea conceptului, din punct de vedere al proiectării în inginerie, atât pentru clădiri noi [144], cât și pentru clădiri existente [154]. O implementare a conceptului într-o fază incipientă a procesului de proiectare al clădirii prin introducerea auditorului energetic în colectivul de proiectare a fost propusă de către autoare în [144].

Trebuie evidențiat aspectul că există deja un fond foarte mare de clădiri existente, care trebuie îmbunătățit pentru ca impactul să fie unul relevant. Acest aspect a fost surprins în cea mai recentă modificare a Directivei 2010/31/EU, (EU) 2018/844 sub forma obligativității de

introducere în statele membre a strategiei de renovare pe termen lung pentru “a sprijini renovarea parcului național de clădiri rezidențiale și nerezidențiale, atât publice, cât și private, într-un parc imobiliar cu un nivel ridicat de eficiență energetică și decarbonizat până în 2050, facilitând transformarea eficace din punct de vedere al costurilor a clădirilor existente în *clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero*” [155].

Având în vedere potențialul reprezentat de clădirile din fondul existent, se învederează faptul că acest concept de proiectare poate reprezenta o soluție viabilă aplicabilă la scară largă, pentru reducerea emisiilor de CO₂ la nivel mondial.

În ceea ce privește implementarea efectivă a conceptului, una dintre întrebările care se ridică este dacă modelele de calcul, de regulă analitice, utilizate în mod curent de către auditorii energetici asigură nivelul de detaliere impus în atingerea indicatorilor, care să permită încadrarea unei clădiri în clădire cu consum de energie aproape egal cu zero.

Această întrebare devine relevantă în momentul implementării soluțiilor propuse la nivel de proiect, în clădirile reale existente, și a monitorizării și măsurării consumurilor de energie după implementarea măsurilor, măsurare care în acest mod devine o metodă indirectă de validare a modelului de calcul utilizat. Totuși, în cazul măsurării consumurilor energetice ar trebui avute în vedere următoarele aspecte care pot determina diferențe față de rezultatele predicționate, cum ar fi:

- Execuția defectuoasă a soluțiilor propuse în auditul energetic și în proiectul tehnic elaborat pe baza auditului energetic;
- Comportamentul utilizatorilor, diferit față de cel din modelul de calcul;
- Temperaturile interioare setate, diferite față de cele din modelul de calcul;
- Date climatice (temperaturi exterioare, intensitatea radiației solare), diferite față de cele prelucrate statistic și care se utilizează la modelare;
- Modul de utilizare al echipamentelor nou introduse care deservește clădirea.

Referitor la execuția defectuoasă a unor soluții de creștere a eficienței energetice a clădirilor existente, câteva situații întâlnite în realitate au fost evidențiate în [156].

Un alt aspect al monitorizării și măsurării consumurilor de energie este cel privitor la răspunderea legală a specialistului care determină rezultatele de economie de energie previzionată și consumuri energetice după implementarea proiectului de modernizare, care deocamdată în România, cel puțin pentru clădiri existente, este auditorul energetic. Diferențe între consumurile de energie predicționate în modelul de calcul și cel înregistrate ulterior implementării soluțiilor pot aduce consecințe juridice nedorite. În Marea Britanie există deja procese de această natură [157].

În această teză, prin capitolul curent, studiile întreprinse se limitează la aplicarea conceptului NZEB la nivelul proiectării în inginerie, abordat parțial într-o manieră științifică, prin utilizarea unor metode specifice cercetării științifice, prin studii de caz pe clădiri reale existente, cu scopul de a identifica aspecte specifice conceptului de proiectare, cu aplicabilitate generală.

6.2 Inițiative de implementare NZEB în clădiri existente la nivel european – Studiu de caz 1: Proiectul neZEH

6.2.1 Proiectul neZEH – descrierea și scopul proiectului

Proiectul neZEH (nearly Zero Energy Hotels) - www.nezeh.eu, este un proiect european cofinanțat de Comisia Europeană prin programul IEE (Intelligent Energy Europe), care a avut ca scop accelerarea procesului de renovare și modernizare a hotelurilor existente în clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero, fiind desfășurat în perioada 2013-2016.

În consorțiul acestui proiect au fost reprezentate 7 țări europene (Suedia, Franța, Italia, Spania, România, Croația și Grecia), iar scopul a fost de transformare a unui număr de 16 clădiri de hoteluri din aceste țări în NZEB, România fiind reprezentată prin proiecte-pilot a trei clădiri cu destinația de hotel de 3 și 4 stele, în jud. Covasna și Brașov. Prima etapă a constat în realizarea unor audituri energetice complexe, a doua etapă - în elaborarea unor studii de fezabilitate în vederea obținerii unor finanțări, iar a treia etapă - în implementarea soluțiilor.

Se face precizarea că în data de 17 martie 2016 acest proiect a fost prezentat la Bruxelles, în Parlamentul European, în fața unor factori de decizie europeni, naționali și regionali, cu scopul ca aceștia să-și asume angajamentul de a susține conceptul aproape Zero Energie în sectorul turismului

Proiectul a fost prezentat și la Nisa (Franța) în cadrul conferinței: *neZEH 2015 – 1st International Conference Sustainable & Competitive Hotels through Energy Innovation*, respectiv la Madrid (Spania), în cadrul conferinței: *neZEH 2016 - 2nd International Conference Nearly Zero Energy Hotels, the Potential for Change*.

În cadrul proiectului neZEH, la nivelul anilor 2015-2016 s-a realizat auditul energetic complex a trei clădiri de hoteluri, autoarea având sarcina de realiza analiza energetică a clădirilor și de a calcula necesarul de energie pentru încălzire al clădirilor studiate, două dintre ele fiind detaliate în studiile de caz din acest subcapitol.

Analiza energetică a clădirilor nerezidențiale a constat în mai multe tipuri de analize:

- *Analiza calitativă prin termografiere*, pentru identificarea poziției punților termice în anvelopa clădirii și a eventualelor defecte ale construcțiilor, inclusiv a etanșeității la aer;
- *Analiza performanței termice* a clădirilor care a cuprins: analiza numerică bidimensională a punților termice caracteristice detaliilor constructive din anvelopele clădirilor: calculul fluxurilor termice perturbate și a coeficienților de cuplaj ai elementelor, în funcție de tipul de punte termică existent, cu softul Therm v.7.2, continuând apoi cu determinarea coeficienților liniari de transfer termic, printr-o metodă analitică, în condițiile de simulare precizate, de principiu, în subcap. 3.1. Analiza la nivel de detaliu constructiv a fost continuată cu analiză la nivel de element de anvelopă clădire, cu determinarea rezistențelor termice corectate pe elementele anvelopei;

- *Analiza performanței energetice* a clădirilor a cuprins: calcul multi-zonal în funcție de funcțiunile principale ale clădirii, respectiv calcul cu intermitență în funcție de modul de utilizare și de programele de funcționare ale zonelor luate în modelul de calcul.

6.2.2 Studiu de caz 1.A

6.2.2.1 Descriere caracteristici clădire

Hotelul Cubix este situat în municipiul Brașov, județul Brașov, în apropierea zonei istorice a orașului, având $S_{cd} = 3014 \text{ m}^2$, regimul de înălțime: D+P+3E și destinația hotel de 4 stele.

Având o arhitectură contemporană, hotelul are o capacitate de cazare de 57 camere, este dotat cu un restaurant, un bistro cu capacitate de 80 de locuri și o sală de conferințe cu capacitate de 100 locuri. Hotelul a fost construit în anul 2008.

Amplasarea clădirii

- Zona climatică: IV, $T_e = -21^\circ\text{C}$;
- Orientare fațada principală: Sud-Vest;
- Zona eoliană: IV;
- Clasa de adăpostire a clădirii: moderat adăpostită;
- Categoria de importanță a construcției: C.



Fig. 6.2 Încadrarea în zonă a clădirii

Descrierea arhitecturală a clădirii și a structurii de rezistență

Principalele funcțiuni ale clădirii sunt:

- 57 camere capacitate de cazare (la parter + 3 etaje);
- Recepție și birouri administrative (la parter);
- Restaurant cu capacitate de 80 locuri (la demisol);
- Sală de conferințe (la demisol);
- Spălătorie, vestiar, camera tehnică și un depozit (la demisol).

Structura de rezistență a clădirii este de tip cadru din beton armat monolit care descarcă pe fundații izolate de tip bloc și cuzinet. La demisol, infrastructura constă dintr-o elevație din beton armat cu grosimea de 30 cm, iar în zona depozitului pereții din beton armat au grosimea de 40 cm. Planșeele intermediare sunt din beton armat cu grinzi longitudinale și transversale.

Închiderile exterioare sunt realizate cu zidărie din BCA cu grosimea de 30 cm, peste care s-a executat o termoizolație de 5 cm din EPS. În zona planșeului terasă este prevăzut un planșeu cu grinzi din beton armat și închideri din panouri metalice compozite cu termoizolație PUR și înveliș metalic, cu grosimea de 10 cm.

Tâmplăria exterioară la etajele 1, 2, 3 este din profile de aluminiu cu geam termoizolant, iar la parter, pe tot perimetrul zonei de recepție, la casa scării și la demisol, sunt prevăzuți pereți cortină cu tâmplărie din aluminiu.

Finisajele interioare – în zona de cazare pereții exteriori sunt placați la partea interioară cu panouri din gips-carton, la demisol pereții sunt tencuiți la interior cu mortar de ciment și zugrăviți cu vopsea lavabilă.

Finisaje exterioare – la exterior, clădirea are fațada ventilată, pereții exteriori fiind placați cu panouri metalice sinus și cu panouri HPL, pe tot conturul. În zona demisolului, pe două fațade sunt realizate umpluturi de pământ peste CTS, pe celelalte fațade în zona de soclu, fiind prevăzută hidroizolație din membrană HDPE.

Descrierea instalațiilor interioare și alcătuirea acestora

Instalații de încălzire - 2 cazane în condensatie pe gaz metan Viessmann, model Vitocrossal 300 tip CT 3, putere nominală/ cazan 225 kW (80/60°C), cu distribuție prin corpuri statice;

Instalații de apă caldă menajeră - 2 boilere de acumulare de capacitate 3000 l fiecare, alimentate de cazane;

Instalații de climatizare - chiller CLIVET, model WSAT-EE-162, capacitate de răcire 37.5 kW, EER 2.8 cu distribuția aerului prin ventilconvectoare de tavan, model FCU 61 MELODY cassette, debite aer: 290 - 740m³/h;

- 2 unități exterioare de tip split, model LG A9UW548FA3, cu unități interioare, model LG ASNH09GERU3;

Instalații de ventilare

- 57 x ventilatoare evacuare aer viciat putere electrică 100W, D = 100 m³/h;
- 1 x ventilator evacuare aer viciat bucătărie (hota), putere electrică 700W, D = 1500 m³/h;
- 1 x ventilator evacuare aer viciat, putere electrică 100W, D = 200 m³/h.

Iluminat - sursele principale folosite pentru producerea luminii artificiale în interiorul hotelului sunt: tuburile fluorescente, becurile incandescente și lămpile cu halogen, putere electrică instalată 30.05 kW.

Regimul de ocupare al clădirii

Clădirea are un regim de ocupare discontinuu, cu diverse orare de funcționare, datorate funcțiunilor multiple, astfel:

La demisol:

Restaurant și bucătărie: 7:00-22:00, L-D (Zona 2);

Spălătorie: 8-16:00, L-D (Zona 3);

Sala de conferințe: 9-17, S-D (Zona 4);

La parter și etaje 1,2,3:

În zona de recepție și zona de cazare, regim de ocupare continuu (Zona 1).

În zona de cazare, *gradul anual de ocupare* al spațiului de cazare este de 64%, conform documentației solicitate și pusă la dispoziție de către managementul hotelului.

La calculul consumului de energie pentru încălzire se ține cont de încălzirea discontinuă, precum și de orarul de funcționare al zonelor printr-un calcul multizonal. Zonarea utilizată este descrisă grafic în Fig. 6.3, Fig. 6.4, cu precizarea că pentru etajele 1, 2 și 3 s-a considerat tot Zona 1 de calcul.

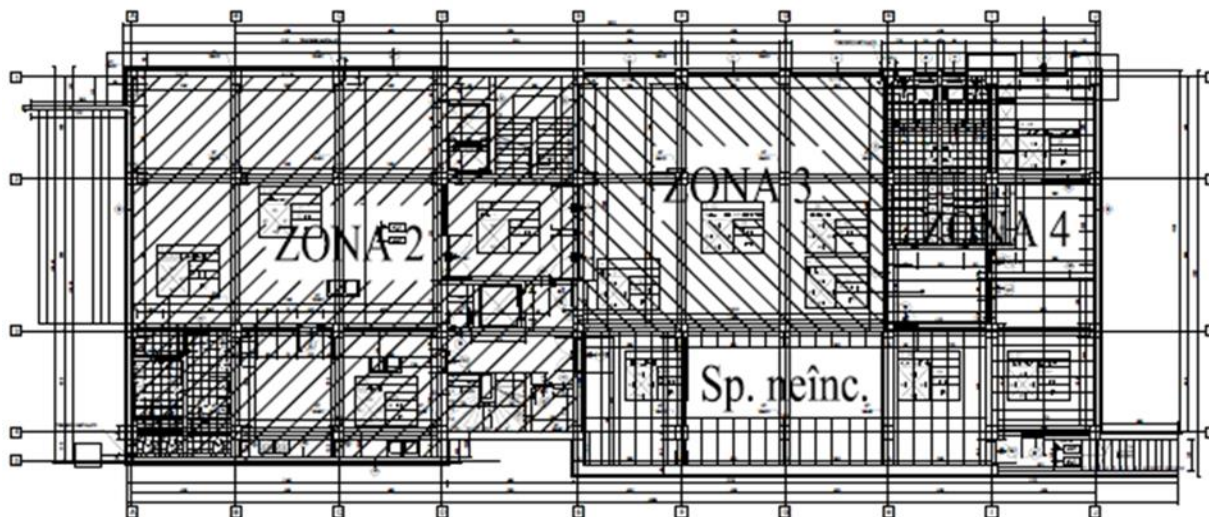


Fig. 6.3 Studiu de caz 1.A: Zone de calcul pe planul demisol

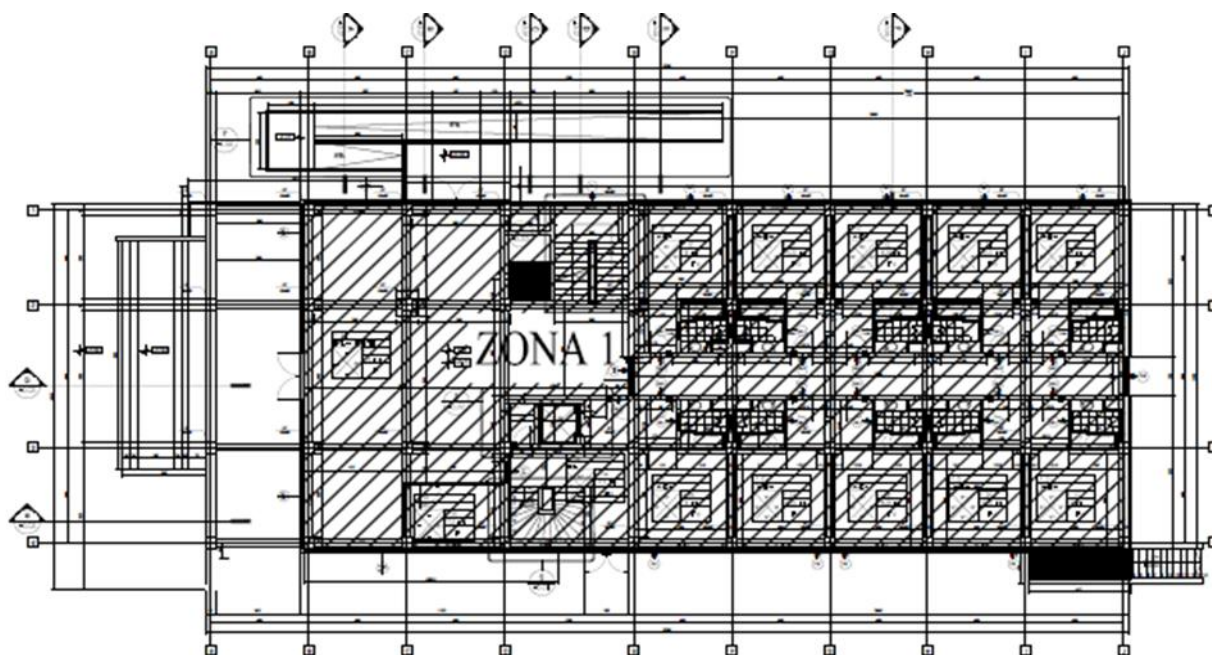


Fig. 6.4 Studiu de caz 1.A: Zone de calcul pe planul parter

6.2.2.2 Analiza vizuală și termografică

Metode utilizate pentru determinarea stării tehnice actuale ale clădirii:

- *investigare vizuală;*
- *termografiere în infraroșu* – metoda calitativă, în care se utilizează o cameră de termoviziune care înregistrează distribuția câmpurilor de temperaturi pe suprafața investigată a anvelopei și prin care se pot detecta neregularitățile termice ale elementelor de construcție. Imaginile termografice s-au realizat cu o cameră de termoviziune ThermoProTM, model: TP8S (Fig. 6.5).



Fig. 6.5 Camera de termoviziune utilizată

Câteva fotografii ale clădirii efectuate în cadrul investigării vizuale sunt prezentate în Fig. 6.6.

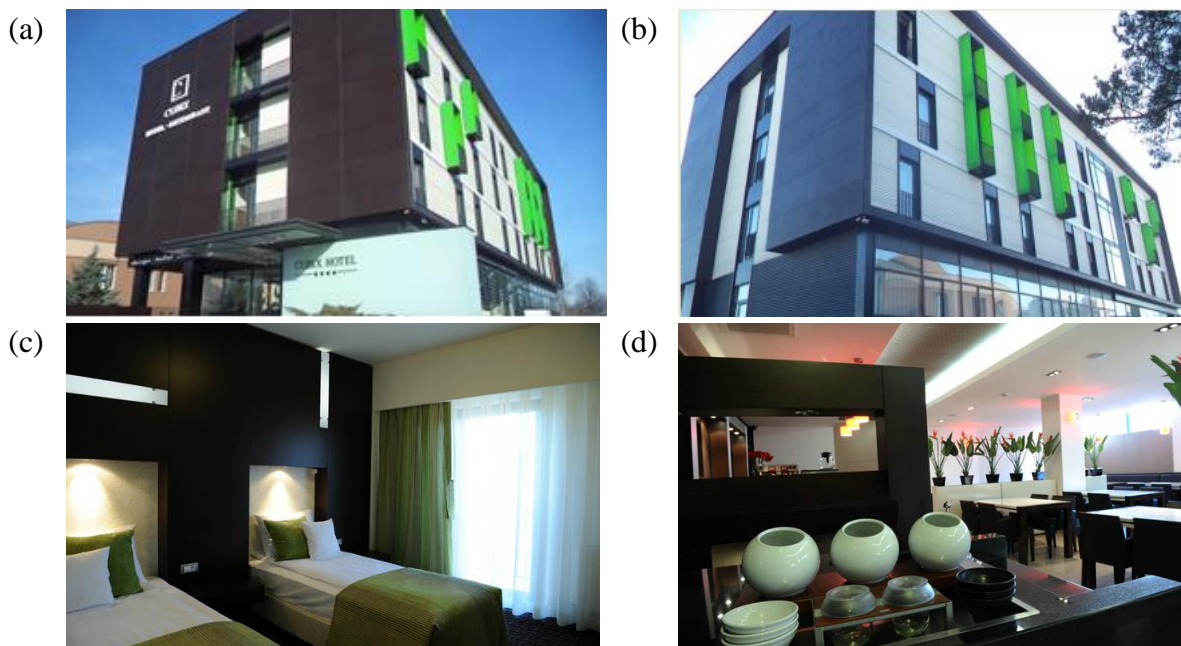


Fig. 6.6 Imagini ale clădirii 1.A: (a) Fațada acces principal, orientare Sud-Vest; (b) Fațada laterală Nord-Vest; (c) Spațiu de cazare din Zona 1; (d) Spațiu din restaurant din Zona 2

Câteva imagini termografice efectuate în cadrul investigației calitative a clădirii sunt prezentate în Fig. 6.7, Fig. 6.8, Fig. 6.9 și Fig. 6.10.

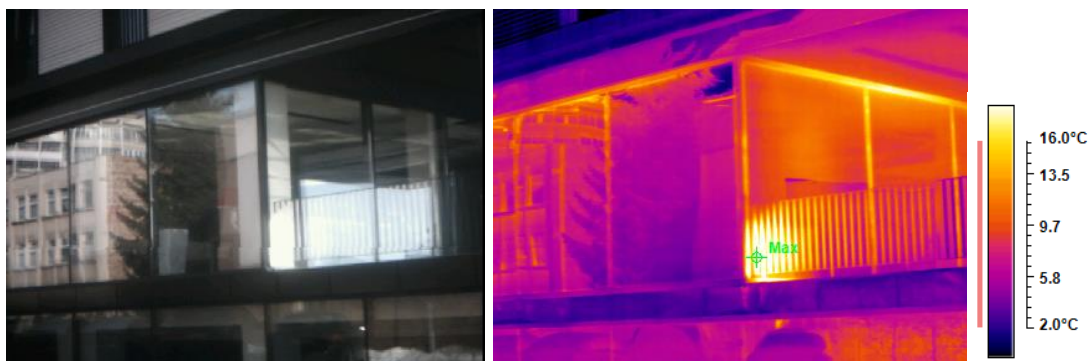


Fig. 6.7 Suprafața exterioară a fațadei SV (zonă acces principal)
(a) imagine în vizibil (b) hartă termografică

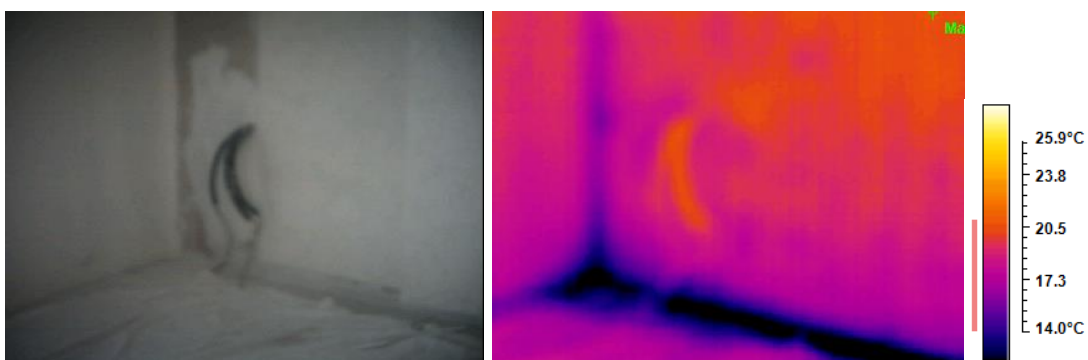


Fig. 6.8 Suprafața interioară perete exterior etajul 1, pe fațada SV
(a) imagine în vizibil (b) hartă termografică

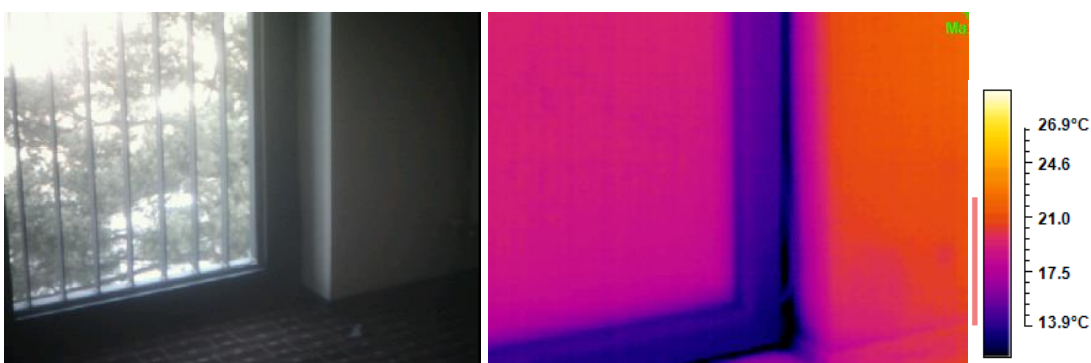


Fig. 6.9 Suprafața interioară perete în zona de îmbinare cu fereastra, cameră la etajul 2, fațada NV
(a) imagine în vizibil (b) hartă termografică

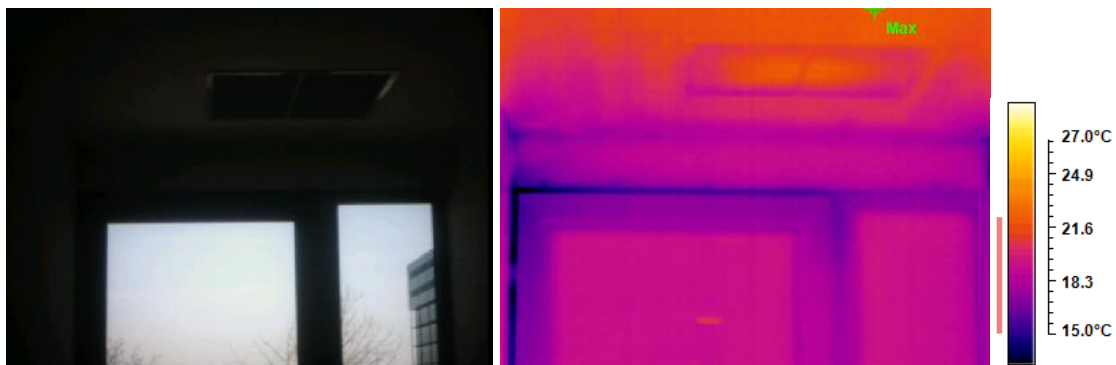


Fig. 6.10 Suprafața interioară a buiandrugului hol principal, etaj 2, fațada NE
(a) imagine în vizibil (b) hartă termografică

Aspecte identificate privind starea tehnică a clădirii

La aceasta clădire proiectul tehnic de execuție a fost pus la dispoziție, dar în vederea identificării unor defecte ascunse ale construcției s-a efectuat un set de imagini termografice. Pereții exteriori fiind de tip fațadă ventilată, o relevanță mai mare o au imaginile surprinse din interiorul construcției pe elementele de închidere perimetrare, cu ajutorul lor fiind identificate defecte de tipul: lipsa termoizolației prevăzute în proiect la intradosul planșeului în consolă (Fig. 6.8) sau schimb de aer din neetanșeități între profilul ferestrelor și perete (Fig. 6.9 și Fig. 6.10).

Din punct de vedere vizual clădirea este corespunzătoare, nu s-au observat fenomene de condens superficial și structural. Clădirea respectă dimensiunile din proiect privind alcătuirea elementelor structurale și nestructurale.

Ca urmare a constatărilor de mai sus, pentru calculul caracteristicilor termotehnice ale elementelor anvelopei, conductivitățile termice nu au fost afectate de coeficienți de majorare.

6.2.2.3 Analiza performanței termice a elementelor anvelopei clădirii

Caracteristicile geometrice ale elementelor anvelopei clădirii s-au stabilit utilizând sistemul dimensional interior total, atât pentru analiza la nivel de detaliu constructiv, cât și pentru analiza la nivel de clădire, pentru fiecare zonă de calcul a clădirii.

Caracteristicile termice ale clădirii s-au determinat utilizând relația (6-1) pentru calculul rezistenței termice unidirecționale și relația (6-2) pentru calculul rezistenței termice corectate.

$$R = \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{d_j}{a_j \cdot \lambda_j} + \frac{1}{\alpha_e} \quad (6-1)$$

unde:

a_j – coeficient de majorare a conductivității termice în funcție de starea și vechimea materialelor, cf. Tab. 5.3.2 – MC001/2006 PII [4];

$$R' = \frac{1}{\frac{\sum \psi \cdot l}{A_j} + \frac{\sum \chi}{A_j}} \quad (6-2)$$

Reducerea rezistenței termice unidirecționale datorită existenței punților termice în elementele constructive este exprimată printr-un coeficient sintetic, r , determinat cu relația (6-3).

$$r = \frac{R'}{R} \quad (6-3)$$

Rezistențele termice unidirecționale au fost corectate cu ajutorul coeficienților liniari de transfer termic, ψ . Pentru cazurile în care acești coeficienți nu au fost găsiți în cataloage de specialitate, au fost efectuate simulări numerice utilizând software-ul Therm v. 7.2.

Simulările numerice efectuate pentru câteva detalii constructive specifice ale clădirii sunt prezentate în Fig. 6.11, Fig. 6.12, Fig. 6.13, Fig. 6.14, Fig. 6.15 și Fig. 6.16.

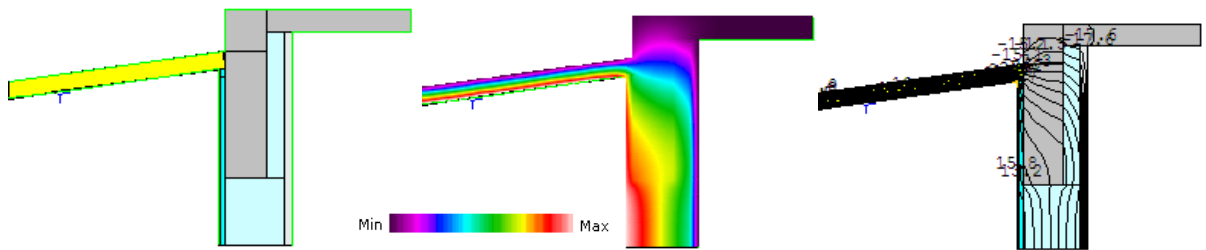


Fig. 6.11 Detaliu vertical - intersecție panouri metalice sandwich de acoperiș cu atic din beton armat netermoizolat
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

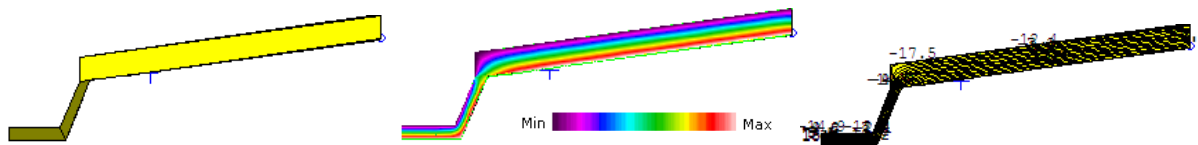


Fig. 6.12 Detaliu vertical - intersecție panouri sandwich de acoperiș cu jgheab de scurgere a apelor pluviale
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

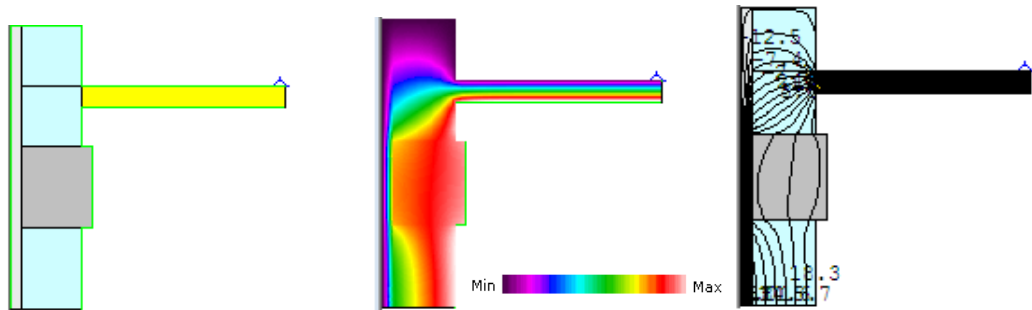


Fig. 6.13 Detaliu vertical - intersecție panouri metalice sandwich de acoperiș cu atic de zidărie din BCA
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

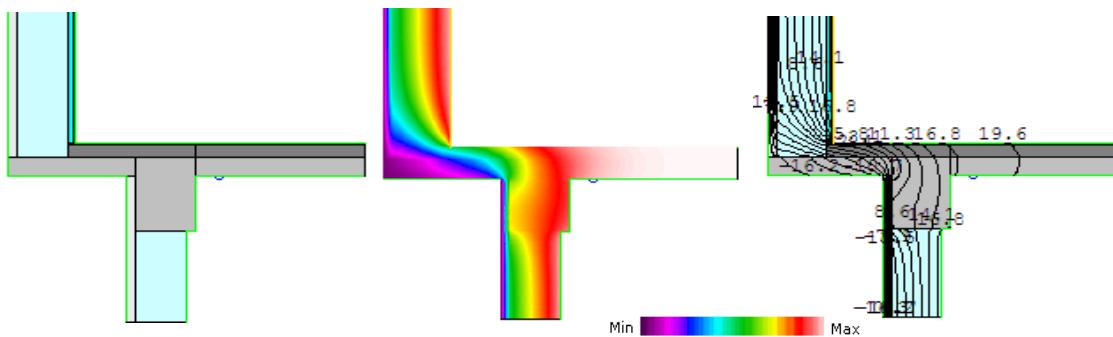


Fig. 6.14 Detaliu vertical - îmbinare perete exterior cu planșeu din b.a. în consolă, cota +3.59 m – tip 1
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

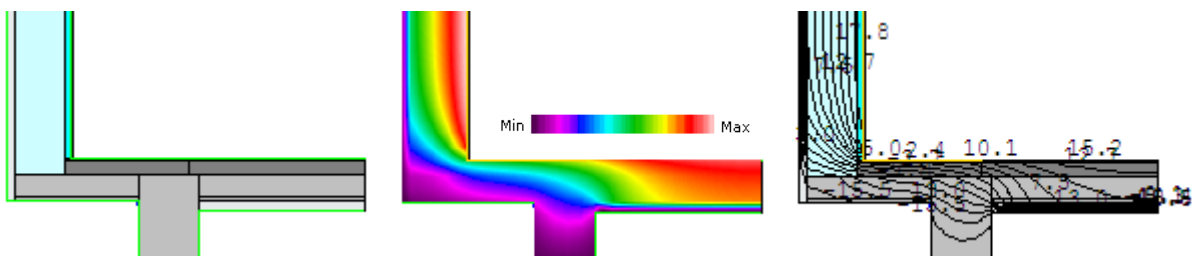


Fig. 6.15 Detaliu vertical - îmbinare perete exterior cu planșeu din b. a., cota +3.59 m – tip 2
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

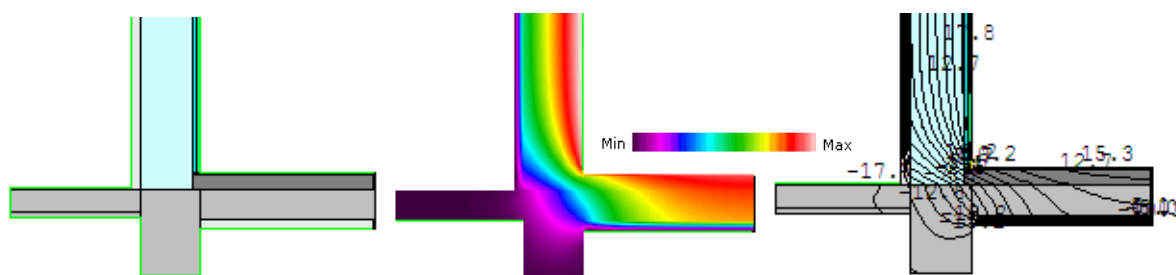


Fig. 6.16 Detaliu vertical - intersecție perete exterior cu planșeu din b. a., cota +3.59 m – tip 3
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

Cu ajutorul coeficienților liniari de transfer termic determinați numeric, utilizând relația (6-2), s-au calculat rezistențele termice corectate pe tip de element constructiv pentru fiecare zonă de calcul a clădirii, rezultatele obținute fiind detaliate în Tab. 6.2, Tab. 6.3, Tab. 6.4 și Tab. 6.5.

Tab. 6.1 Alți parametri de calcul termotehnic ai clădirii 1.A

Parametrii	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
A_e [m ²]	2068.68	504.72	200.63	217.79
V [m ³]	6580.79	849.78	408.17	329.97
n_a [h ⁻¹]	1.126	0.6	0.6	0.6

Se face precizarea că în clădire nu există echipamente de tip CTA (centrală de tratare aer).

Tab. 6.2 Studiu de caz 1.A: Caracteristici geometrice și termice – situație inițială, Zona 1

Elementul de construcție	Orientare	A [m ²]	R [(m ² K)/W]	r [-]	R' [(m ² K)/W]
Pereți exteriori	NV	359.01	2.624	0.718	1.884
Pereți exteriori	NE	174.44	2.624	0.796	2.089
Pereți exteriori	SV	141.23	2.624	0.819	2.149
Pereți exteriori	SE	388.11	2.624	0.731	1.918
Ferestre exterioare	NV	52.8	0.45	-	0.45
Ferestre exterioare	NE	15.11	0.45	-	0.45
Ferestre exterioare	SV	11.04	0.45	-	0.45
Ferestre exterioare	SE	59.4	0.45	-	0.45
Pereți cortina	NV	70.22	0.45	-	0.45
Pereți cortina	SE	40.61	0.45	-	0.45
Pereți cortina	NV	22.43	0.526	-	0.526
Pereți cortina	SV	38.71	0.526	-	0.526
Pereți cortina	SE	27.77	0.526	-	0.526
Panou perete ext	NV	6.48	2.624	0.718	1.884
Planșeu inferior parter	-	56.88	1.802	0.637	1.148
Planșeu inferior parter 2	-	2.69	1.802	0.637	1.148
Planșeu terasa ext	-	537.55	2.774	0.819	2.272
Trapa terasă	-	1.00	0.40	1.00	0.40
Planșeu neîncălzit	-		0.496	0.83	0.411

Tab. 6.3 Studiu de caz 1.A: Caracteristici geometrice și termice – situație inițială, Zona 2

Elementul de construcție	Orientare	A [m ²]	R [(m ² K)/W]	r [-]	R' [(m ² K)/W]
Pereți exteriori NV	NV	7.21	1.554	0.357	0.555
Pereți exteriori SE	SE	11.83	1.554	0.52	0.808
Pereți cortina	NV	17.45	0.45	-	0.45
Pereți cortina	SV	1.15	0.45	-	0.45
Luminator bucatarie	-	3.67	0.4	-	0.4
Planșeu exterior cota +0.10 m	-	61.37	1.472	0.856	1.26
Pereți sol	-	135.93	1.493	-	1.56
Placa sol	-	252.4	3.341	-	5.613
Per. spre sp. secundare (ALA)	-	13.72	0.576	0.9	0.518

Tab. 6.4 Studiu de caz 1.A: Caracteristici geometrice și termice – situație inițială, Zona 3

Elementul de construcție	Orientare	A [m ²]	R [(m ² K)/W]	r [-]	R' [(m ² K)/W]
Pereți exteriori NV	NV	4.28	1.554	0.36	0.555
Pereți cortina NV	NV	11.9	0.45	-	0.45
Pereți sol	-	24.63	1.493	-	1.13
Placa sol	-	119	3.341	-	6.488
Pereți spre sp. neîncălzit (ALA)	-	40.82	0.576	0.9	0.518

Tab. 6.5 Studiu de caz 1.A: Caracteristici geometrice și termice – situație inițială, Zona 4

Elementul de construcție	Orientare	A [m ²]	R [(m ² K)/W]	r [-]	R' [(m ² K)/W]
Pereți exteriori	NV	2.9	1.554	0.36	0.555
Pereți exteriori	NE	10.78	1.554	0.9	1.399
Pereți exteriori	SE	3.25	1.554	0.52	0.808
Fereste exterioare	SE	10.29	0.45	-	0.45
Pereți cortină	NV	8.05	0.45	-	0.45
Pereți sol	-	58.53	1.493	-	1.51
Placă sol	-	96.20	3.341	-	4.333
Per. spre sp. neîncălzit (ALA)	-	27.78	0.576	0.9	0.518

6.2.2.4 Analiza performanței energetice a clădirii

Parametrii climatici

- Parametrii climatici exteriori utilizați sunt: temperaturii exterioare medii lunare și valori medii lunare pentru intensitatea radiației exterioare, în funcție de amplasament.
- Ecuațiile de bilanț termic fac *bilanțul fluxurilor termice*.

Intensitatea radiației solare și temperaturile exterioare medii lunare

- *Intensitățile radiației solare* sunt stabilite utilizând MC 001/2006-PI, Anexa A.9.6 [4], pentru localitatea Predeal, care este amplasată la cca. 20 km față de localitatea Brașov, pentru care nu există date naționale ale intensității radiației solare în MC 001/2006.

- Temperaturile exterioare medii lunare sunt stabilite utilizând SR 4839/ 2014 [158], pentru localitatea Brașov.

Temperatura interioară de calcul

Corelat cu zonele luate în considerare în analiza clădirii, s-a determinat temperatura interioară medie volumică, ca medie ponderată a temperaturilor interioare Θ_j , cu volumele utile ale zonelor j ($V_{u,j}$), cu relația (6-4), având ca și temperaturi de referință, temperaturile indicate în STAS 1907/2 [159].

$$\theta_j = \frac{\sum(\theta_{i,j} \cdot V_{u,j})}{\sum V_{u,j}} \quad (6-4)$$

Pentru zonele de calcul luate în considerare, rezultă următoarele temperaturi medii volumice:

Zona 1: Cazare + zonă de recepție	$\Theta_i = 19.46 \text{ }^\circ\text{C}$
Zona 2: Restaurant + bucătărie, inclusiv spații anexe	$\Theta_i = 17.51 \text{ }^\circ\text{C}$
Zona 3: Sala de conferințe	$\Theta_i = 18 \text{ }^\circ\text{C}$
Zona 4: Spălătorie, vestiare, inclusiv spații anexe	$\Theta_i = 18.36 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura interioară a spațiilor neîncălzite

Conform metodologiei MC001/1-2006 [4], pentru calculul temperaturii interioare în spațiile neîncălzite se efectuează un bilanț termic, în funcție de rezistențele termice și de temperaturile de calcul aferente încăperilor adiacente care delimitează spațiul neîncălzit de spațiul încălzit. În calcul se ține cont de rata schimbului de aer în spațiul neîncălzit.

În această clădire există ca și spațiu neîncălzit (zona secundară) o parte din demisol, în zona cu destinația depozitare/adăpost ALA. Temperaturile rezultate în urma bilanțului efectuat sunt prezentate în Fig. 6.17.

[°C]					
[Lunar]					
Ianuarie	12.799	Februarie	13.003	Martie	14.251
Aprilie	15.589	Mai	16.792	Iunie	17.495
Iulie	17.858	August	17.744	Septembrie	16.701
Octombrie	15.521	Noiembrie	14.228	Decembrie	13.094

Fig. 6.17 Temperaturi în spațiul neîncălzit (spațiul secundar)

Calculul necesarului de încălzire al clădirii

Necesarul de căldură anual pentru încălzire a fost determinat conform MC001/2:2006, Cap. II.5 [4], iar metoda de calcul utilizată pentru calculul necesarului de încălzire respectă ipotezele:

- În procesul de transfer de căldură prin elementele anvelopei clădirii se ține cont de specificul dinamic al proceselor;

- Pasul de timp este luna (metoda lunară);
- În bilanțul termic se ține cont de aporturile solare și de aporturile interne de căldură.

Modelul de calcul adoptat este unul multizonal, clădirea fiind împărțită în următoarele zone:

- 4 zone principale: zona cazare+recepție (P + Etaj 1, 2, 3), zona restaurant + bucătărie (demisol), zona sală de conferințe (demisol), zona spălătorie + spații anexe (demisol);
- 1 zonă secundară, adiacentă zonelor principale, formată din adăpostul ALA/ spațiu de depozitare (demisol).

Metoda utilizată pentru determinarea necesarului de încălzire este [4], [160]:

$$Q_{inc_j}^{an} = 0.024 \cdot \left(\frac{S_E}{R} + 0.33 \cdot B_{1S} \cdot n_a \cdot V \right) \cdot (\bar{\theta}_{iRS} - \bar{\theta}_{eRS}) \cdot D_z \quad (6-5)$$

unde:

S_E - suprafața anvelopei clădirii [m^2];

B_{1S} - coeficient de corecție [-];

n_a - rata de ventilare a spațiilor [h^{-1}];

D_z - durata sezon de încălzire [zile];

$\bar{\theta}_{iRS}$ - temperatura interioară medie corectată în luna "k" [$^{\circ}C$];

$\bar{\theta}_{eRS}$ - temperatura exterioară medie corectată în luna "k" [$^{\circ}C$].

Pentru zonele în care a fost necesară simularea în regim de încălzire discontinuu (spațiile aflate în demisol), s-a efectuat o corecție a necesarului de căldură prin calculul coeficientului de corecție, β_k , în fiecare lună "k" din sezonul de încălzire, cu relația (6-6) [160]:

$$\beta_k = \left(\frac{t_f + t_{a(k)} \cdot \alpha_{0(k)} + t_{G(k)} \cdot \xi_{(k)} \cdot T_{iR(k)}^{-1}}{t_p} \right) \quad (6-6)$$

unde:

t_f - durata medie de ocupare a clădirii în perioada t_p considerate cu funcționare continuă a instalației de încălzire interioară [h];

$t_{a(k)}$ - durata optimă de reîncălzire a clădirii în condiții climatice medii caracteristice lunii "k" [h];

$t_{G(k)}$ - durata totală de funcționare a instalației de încălzire pentru asigurarea temperaturii interioare de gardă, Θ_{iG} , în condiții climatice medii caracteristice lunii "k" [h/zi];

t_p - durata considerată pentru determinarea coeficientului de corecție;

T_c - constanta de timp a construcției [h];

Coeficienții β_k modifică numărul de grade-zile aferent fiecărei luni a sezonului de încălzire.

Privitor la calculul multizonal se face precizarea că limitele care separă zonele principale de calcul în interiorul clădirii sunt considerate limite adiabatice.

În Tab. 6.2 sunt centralizate principalele rezultate obținute în analiza energetică multizonală și necesarul de energie pentru încălzire obținut.

Tab. 6.6 Studiu de caz 1.A: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea reală

Zona	R_s	θ_{io}	θ_{iRS}	D_z	NGZ	NGZ^*	NGZ^*/NGZ	Q_{inc}^{an}
Zona 1	1.186	19.46	16.984	259	2848	-	-	344091.31
Zona 2	1.8	17.51	13.188	191	1498	1498	-	16543.98
Zona 3	1.503	18	15.23	230	1603	1014	0.63	5499.88
Zona 4	1.385	18.36	15.348	218	1754	1315	0.75	9125.98
Total:								375261.15

Clădirea de referință

S-a refăcut calculul cu parametrii clădirii de referință, pe zone, rezultatele obținute fiind centralizate în Tab. 6.7.

Tab. 6.7 Studiu de caz 1.A: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea de referință

Zona	R_s	θ_{io}	θ_{iRS}	D_z	NGZ	NGZ^*	NGZ^*/NGZ	Q_{inc}^{an}
Zona 1	1.754	19.46	14.765	219	2246	-	-	143117.41
Zona 2	2.995	17.51	11.595	175	1290	1290	-	10410.38
Zona 3	2.021	18	14.643	239	1931	1335	0.69	5979.33
Zona 4	1.894	18.36	14.694	231	1988	1566	0.79	8924.77
Total:								168431.89

6.2.2.5 Soluții și detalii optimizate energetic, analiza tehnico-economică

Așa cum a rezultat în urma analizei imaginilor termografice, o problemă majoră a acestei clădiri o reprezintă schimbul necontrolat de aer cu exteriorul din prinderea neetanșă de perete a ferestrelor exterioare din zona camerelor, a holurilor de acces camere și a casei scării, chiar dacă acestea sunt prevăzute cu sisteme de tâmplărie termoizolantă.

Problema se extinde la nivelul zidăriei, prin inspecția termografică determinându-se pierderi de aer prin zidăria din BCA, aceasta fiind executată defectuos, rosturile de țesere ale zidăriei, din mortar de ciment, nefiind executate corespunzător, iar termosistemul existent din EPS fiind fixat doar mecanic sub fațada ventilată, ceea ce face plauzibilă ipoteza existenței unui schimb suplimentar de aer inclusiv în zona pereților exteriori.

În baza acestor observații și în urma modelului de calcul adoptat pentru determinarea consumului anual de energie pentru încălzire și a rezultatelor obținute se propun următoarele soluții (Var. 2), cu aplicarea lor simultană:

Pentru ferestre se propune ca măsură demontarea acestora și aplicarea unor benzi de etanșare perimetrice profilelor din Al, atât spre interior, cât și spre exterior care să permită difuzia vaporilor spre exterior, în vederea menținerii rostului de îmbinare uscat. Suplimentar, se recomandă etanșarea îmbinărilor cu o bandă flexibilă precomprimată din PUR, în vederea reducerii pierderilor de căldură prin convecție (vezi Fig. 6.18).

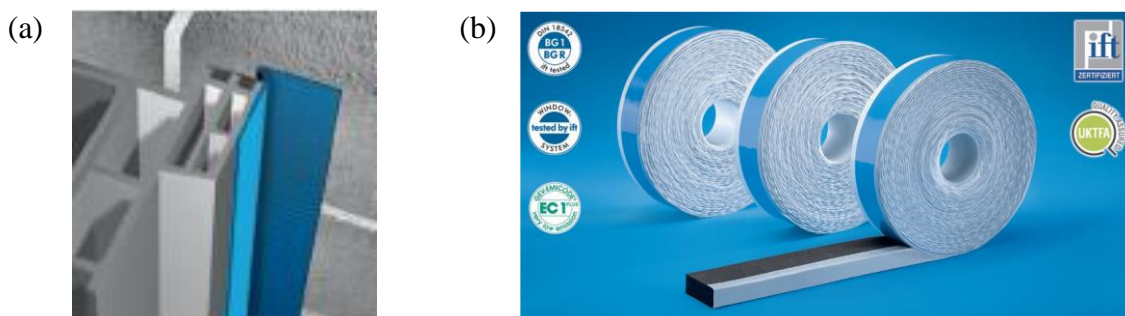


Fig. 6.18 Soluții propuse de etanșare a îmbinărilor tâmplărie ferestră/ ușă cu peretele exterior [161]
(a) Benzi ISO Connect-Vario XD. Producător: ISO CHEMIE GmbH (b) Benzi precomprimăte ISO BLOCO ONE

Pentru pereții exteriori sub fațada ventilată din profile metalice sinus și plăci HPL, se propune îndepărtarea termosistemului existent (5 cm EPS) și aplicarea prin lipire pe un strat continuu de mortar și fixare mecanică a unor plăci din vată minerală bazaltică ignifugată, conductivitate termică maxim $\lambda = 0.037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\rho < 60\text{-}100 \text{ kg}/\text{m}^3$, cu grosimea de 14 cm și refacerea placării fațadei. Prin această măsură se elimină schimbul necontrolat de aer identificat pe anumite zone de pereți și se asigură un material termoizolant cu grad înalt de siguranță la incendiu în spatele placajelor.

Pentru consolele plăcii peste parter în zona camerelor pe fațada principala SV, se recomandă termoizolarea la intradosul plăcii cu 20 cm EPS grafitat, conductivitate termică de proiectare maxim $\lambda = 0.036 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ - Fig. 6.21.

Pentru planșeul inferior peste parter, în zona de acces, se recomandă suplimentarea termosistemului actual, cu 15 cm EPS grafitat, $\lambda = 0.036 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, cu termoizolarea inclusiv a grinzii (vezi Fig. 6.22 și Fig. 6.23).

În zona planșeului terasă necirculabilă cu închideri din panouri compozite termoizolate cu PUR și înveliș metalic, se recomandă termoizolarea suplimentară, la interior, cu 15 cm de vată minerală de sticlă $\lambda = 0.037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\rho = 18 - 25 \text{ kg}/\text{m}^3$, dispusă în câmp continuu, în vederea obținerii unei rezistențe termice corectate a planșeului peste valoarea de $5 \text{ (m}^2\text{K)}/\text{W}$. La partea interioară a termoizolației suplimentare, se recomandă prevederea unei bariere de vapori.

Având în vedere detaliile de execuție puse la dispoziție din proiectul tehnic al construcției și în vederea ameliorării efectului de punte termică al aticelor din beton armat de pe fațadele longitudinale, se recomandă termoizolarea aticelor în întregime, inclusiv consolele, cu 10 cm de EPS grafitat (vezi Fig. 6.20).

Se recomandă termoizolarea planșeului și a pereților spre depozitul neîncălzit la intradosul planșeului, respectiv pe pereți, cu 10 cm EPS, în vederea reducerii pierderilor de căldură ale spațiilor încălzite spre depozitul neîncălzit. Termoizolația se protejează cu o masă de șpaclu armată cu plasă din fibră de sticlă.

În zona de acces principal, se recomandă executarea unui windfang din sticlă, în vederea unei modificări cât mai mici în arhitectura acestei zone, dar mai ales pentru a asigura un spațiu tampon între mediul exterior și mediul încălzit. În prezent, faptul că ușa se deschide automat direct spre exterior, asociat cu neetanșeitarea fațadei cortină din zona casei scării, mărește debitul de aer proaspăt care trebuie încălzit/răcit, ușa acționând ca o priză de aer la fiecare deschidere.

Tab. 6.8 Studiu de caz 1.A: Performanțe termice ale elementelor anvelopei după termoizolare

Tipul elementului de construcție	Măsurile analizate și propuse pentru termoizolare anvelopă clădire		Transmitanță termică corectată U'
			[W/(m ² K)]
Pereți exteriori	Var. 1	Termoizolație exterioară cu 10 cm vată minerală bazaltică ignifugată, $\lambda = 0.037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\rho < 60\text{-}100 \text{ kg}/\text{m}^3$	var. 0.295-0.348
	Var. 2	Termoizolație exterioară cu 14 cm vată minerală bazaltică ignifugată, $\lambda = 0.037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\rho < 60\text{-}100 \text{ kg}/\text{m}^3$	var. 0.244 - 0.263
Terasa exterioară necirculabilă ultimul nivel	Var. 1-2	Termoizolație suplimentară, la interior, cu 15 cm vată minerală de sticlă, $\lambda = 0.037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\rho = 18\text{-}25 \text{ kg}/\text{m}^3$, cu barieră de vapori pe fața caldă a termoizolației	0.182
Planșee inferioare ext. în zona de acces principal	Var. 1	Termoizolarea cu 15 cm EPS grafitat, $\lambda = 0.037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	0.318
	Var. 2	Termoizolarea cu 20 cm EPS grafitat, $\lambda = 0.037 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	0.279



Fig. 6.19 Soluții propuse pentru termoizolare - materiale termoizolante
(a) vată minerală bazaltică [162] (b) vată minerală de sticlă [162] (c) EPS grafitat [163]

Pentru obținerea performanțelor termice indicate în Tab. 6.8, s-a efectuat optimizarea detaliilor constructive cu scopul reducerii influenței punților termice, printr-o conformare care să asigure reducerea transferului de flux termic. Conformarea propusă și rezultatele grafice ale simulărilor numerice sunt prezentate pentru câteva detalii constructive în: Fig. 6.21, Fig. 6.22 și Fig. 6.23.

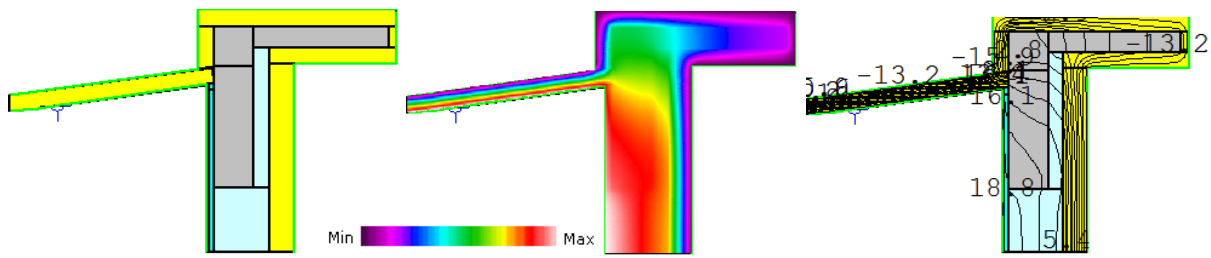


Fig. 6.20 Detaliu vertical optimizat - intersecție panouri compozite termoizolate cu atic din beton armat
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

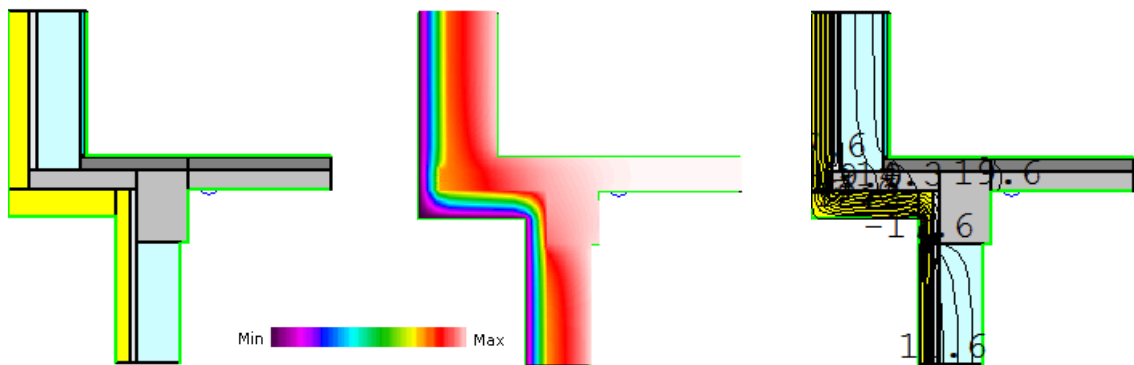


Fig. 6.21 Detaliu vertical optimizat - îmbinare pereți exteriori cu planșeu din b.a. în consolă, cota +3.59 m- tip 1
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

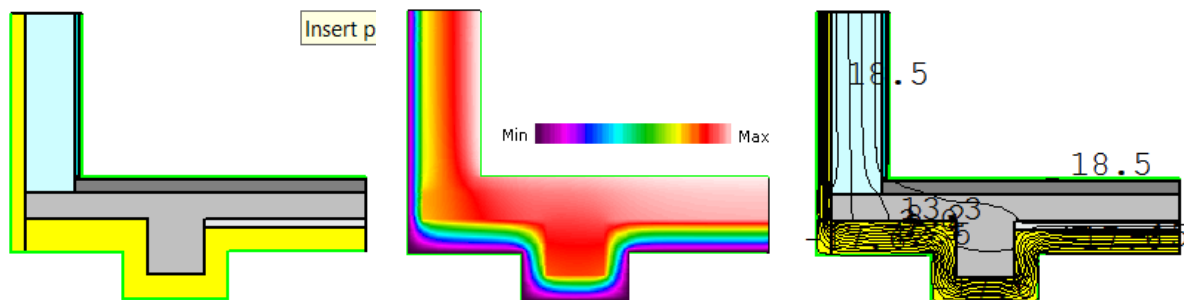


Fig. 6.22 Detaliu vertical optimizat - îmbinare pereți ext. cu planșeu din b.a., cota +3.59 m-tip 2
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

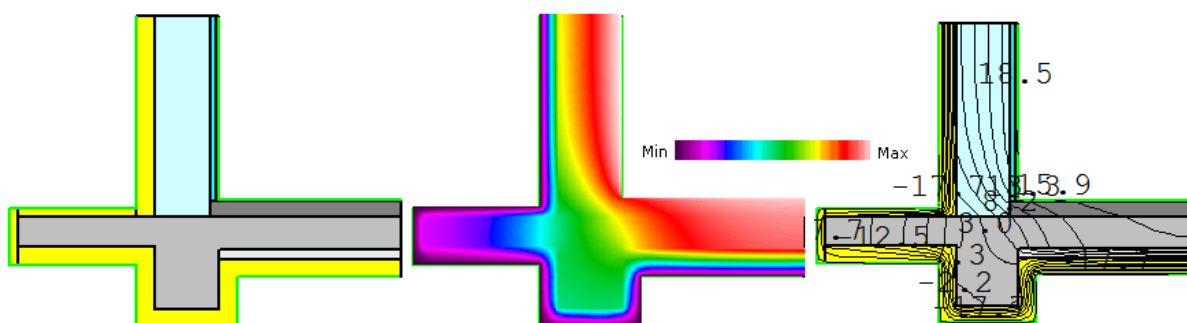


Fig. 6.23 Detaliu vertical optimizat - intersecție pereți ext. cu planșeu din b.a., cota +3.59 m-tip 3
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

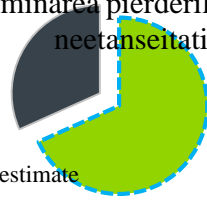
Analiza financiară și a economiei de energie a proiectului

În Tab. 6.9, Tab. 6.10, Tab. 6.11 și Tab. 6.12 s-au făcut diverse analize tehnico-economice care permit evaluarea fezabilității implementării măsurilor propuse.

Tab. 6.9 Studiu de caz 1.A: Analiză tehnico-economică 1

Consum actual				Economii		
An	[MWh]	[t.e.p.]	[Euro]	[MWh]	[t.e.p.]	[Euro]
2014	404.6	34.76	12588	276	23.74	8598

Izolarea termică a clădirii și eliminarea pierderilor prin neetanșeități



31.70 %
68.30 %

■ Economii estimate
■ Consum en după implementarea soluției

Tab. 6.10 Studiu de caz 1.A: Analiza tehnico-economică 2

Soluția de eficientizare	Izolarea termică a clădirii și eliminarea pierderilor prin neetanșeități			
Descrierea situației curente	Stratul de izolație actual EPS măsoara 5 cm grosime; clădirea prezintă neetanșeități în special în zona pereților cortină			
Soluție propusă	Reabilitarea izolației termice a clădirii și a măsurilor de reducere a pierderilor de aer în zona ferestrelor și a pereților cortină			
	[-]	Agent termic		
ECONOMII Energie		En. electrică	Gaz metan	Total
	[kWh/an]	0	276361	276361
ECONOMII Energie raportat la consumator		En. electrică	Gaz metan	Total
	[%]	0.0%	68.3%	68.3%
ECONOMII Energie raportat la consumul total al Hotelului		En. electrică	Gaz metan	Total
	[%]	0.0%	50.9%	36.9%
Reducere emisii CO ₂	[kg CO ₂ /an]	60799		
Reducere emisii CO ₂ din total	[%]	23.78%		
Economii	[€ / an]	8598		
Cost echipamente	[€]	50518		
Pondere manoperă	[%]	38%		
Cost manoperă	[€]	30735		
Investiție	[€]	81253		
Perioada simplă de recuperare investiție	[ani]	9.5		

Tab. 6.11 Studiu de caz 1.A: Analiză tehnico-economică 3

Soluție	Izolarea termică a clădirii și eliminarea pierderilor prin neetanșeități		
Investiție	81253		
Durata de viață	20		
Economie soluție		anuală	perioada de viață
	kWh	2763610	5527218
	euro	8598	171958
KPI Euro investit / MWh economisit	14.70		

Tab. 6.12 Studiu de caz 1.A: Indicatori economici

Soluție tehnică	Investiție	ECO	VNA	RIR	PSR
	[EURO]	[EURO/an]	[EURO]	[%]	[ani]
Izolarea termică a clădirii și eliminarea pierderilor prin neetanșeități	81253	8598	22657	8.2%	9.45

Având în vedere că acest proiect a reprezentat în final munca unui colectiv de specialiști, informativ, s-au considerat de interes rezultatele întregii echipe, inclusiv pe specializările instalații, inginerie electrică, automatizări, surse regenerabile de energie, astfel că în Fig. 6.24 și Tab. 6.13 sunt prezentate rezultatele proiectului neZEH.

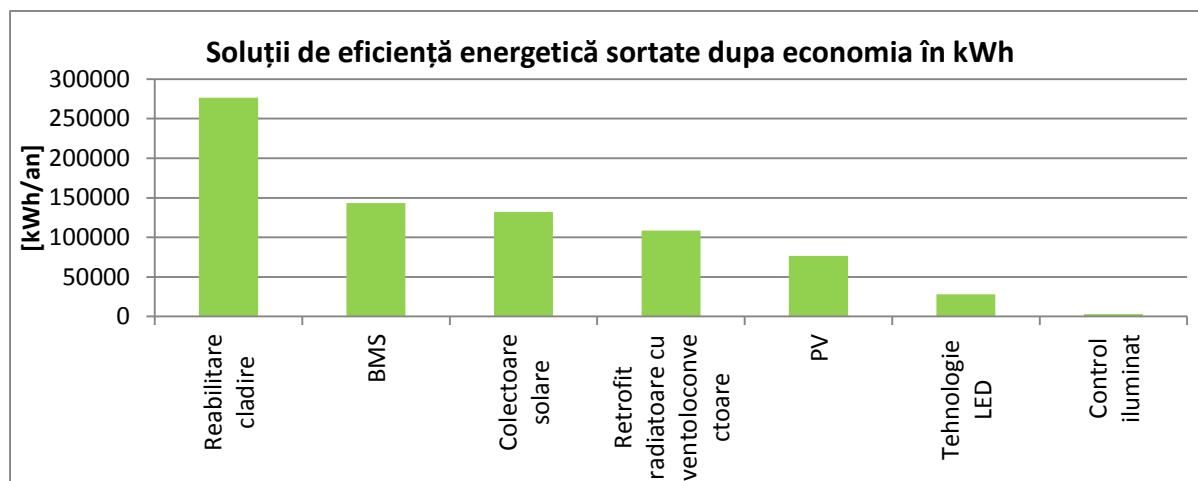


Fig. 6.24 Economii de energie cu pachetul de măsuri propuse pentru modernizarea Clădirii 1.A

Tab. 6.13 Cuantificare economii de energie și financiare totale pe pachetul de măsuri global

Consum actual total Hotel				Economii en. totale		
An	[MWh]	[t.e.p.]	[Euro]	[MWh]	[t.e.p.]	[Euro]
2014	749.3	64.37	37709	566	48.53	31367

Economii de energie pachet global

24.6
2%

75.3
8%

Economii estimate

Maximul de economie cuantificată pentru Clădirea 1.A este de 566,005 kWh/an, adică 75.3% din consumul total actual. Perioada simplă de recuperare a investițiilor este de 13.2 ani.

6.2.3 Studiu de caz 1.B

6.2.3.1 Descriere caracteristici clădire

Hotelul Balványos este localizat în județul Covasna, într-o zonă turistică lângă lacul Sfânta Ana, singurul lac vulcanic din România, având regimul de înălțime Sp+P+Mez+4E. Clădirea a fost construită între anii 1933-1934 și apoi renovată și extinsă în anii 2007-2008.

Inițial clădirea a funcționat ca sanatoriu, iar începând cu anul 1980 și-a modificat destinația într-un hotel. Luându-se în considerare schimbările sociale și economice, dar și potențialul turistic al zonei, în 2007 clădirea a fost renovată și extinsă astfel încât să aibă funcționalitatea unui hotel de 4 stele.

Clădirea are în plan o formă rectangulară, fațada principală și fatadele laterale având la unele niveluri pereții retrași din planul fațadelor. Pe fațada posterioară (nordică), în 2007, au fost construite două corpuri de clădire noi, integrate în clădirea inițială, separate prin rosturi de aceasta, cu închideri verticale realizate din pereți cortină.

Amplasarea clădirii

- Zona climatică: V, conform fig. III.1, *Zonarea climatică iarnă de calcul*, din MC001-6/2013, $T_e = -25^\circ\text{C}$ (în vigoare la momentul efectuării pr.);
- Clădirea este orientată cu fațada principală spre Sud;
- Zona eoliană: IV, conform STAS 10101/90;
- Clasa de adăpostire a clădirii: moderat adăpostită;
- Categoria de importanță a construcției: C.



Fig. 6.25 Încadrarea în zonă a clădirii 1.B

Descrierea arhitecturală a clădirii și a structurii de rezistență

Principalele funcțiuni ale clădirii sunt:

- 184 camere capacitate de cazare (parter + etaje);
- Recepție/lobby/ bar (parter);
- 2 Restaurante cu capacitate de 100 locuri/ 60 locuri (parter);
- 2 Săli de conferințe (la mezanin);
- Zona expozițională/ lounge (mezanin);
- Vestiare, depozite, spații anexe (parter, subsol).

Au fost identificate 11 tipuri diferite de pereți, 11 tipuri de planșee și 4 tipuri de ferestre/elemente vitrate - se descriu în Anexa la Certificatul de performanță energetică.

Descrierea instalațiilor interioare și alcătuirea acestora - se descriu în Anexa la Certificatul de performanță energetică.

Regimul de ocupare al clădirii

Clădirea are un regim de ocupare discontinuu, cu diverse orare de funcționare, datorate funcțiunilor multiple, astfel:

La parter:

- 2 Restaurante și bucătărie: 7:00-22:00 L-D (Zona 1);
- Recepție, lobby, bar – continuu (Zona 2);
- Corp A (camere de cazare) – continuu (Zona 3);

La mezanin:

- Săli de conferințe: 9-17 S-D (Zona 4);
- Zona expozițională – continuu (Zona 5);

La etaje 1, 2, 3, 4:

- Zona de cazare - continuu (Zona 6);

La subsol parțial:

- Spații anexe care deservește bucătăria (Zona 7).

La calculul consumului de energie pentru încălzire se ține cont de încălzirea discontinuă, precum și de orarul de funcționare al zonelor printr-un calcul multizonal.

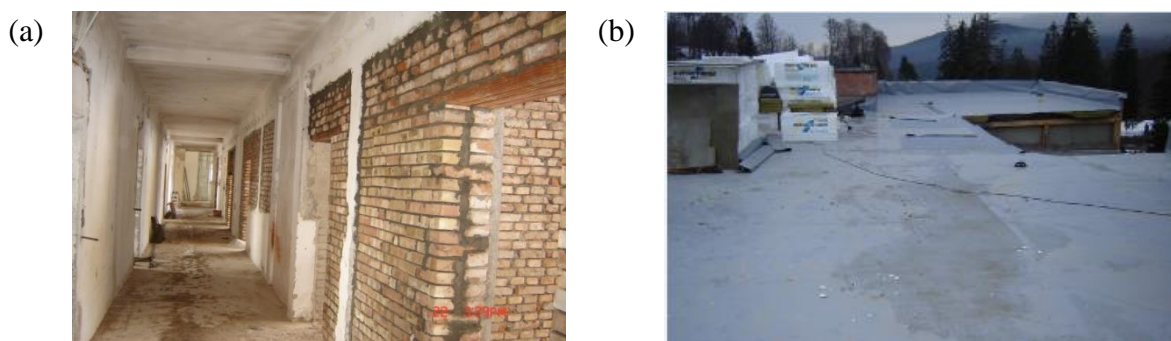
6.2.3.2 Analiza vizuală și termografică

Câteva fotografii ale clădirii efectuate în cadrul investigației vizuale sunt prezentate în Fig. 6.26.



Fig. 6.26 Imagini ale clădirii I.B: (a) Fațadele Sud și Vest ale clădirii; (b) Pereți exteriori fațada Sud; (c) Fațada Nord – pereți cortină; (d) Partea estică a acoperișului terasă la cota +16.75 m; (e) Et.1 și mezanin (stg. – zona de cazare, dr. – lounge)

Totodată, au fost puse la dispoziție poze din șantierul din 2007:



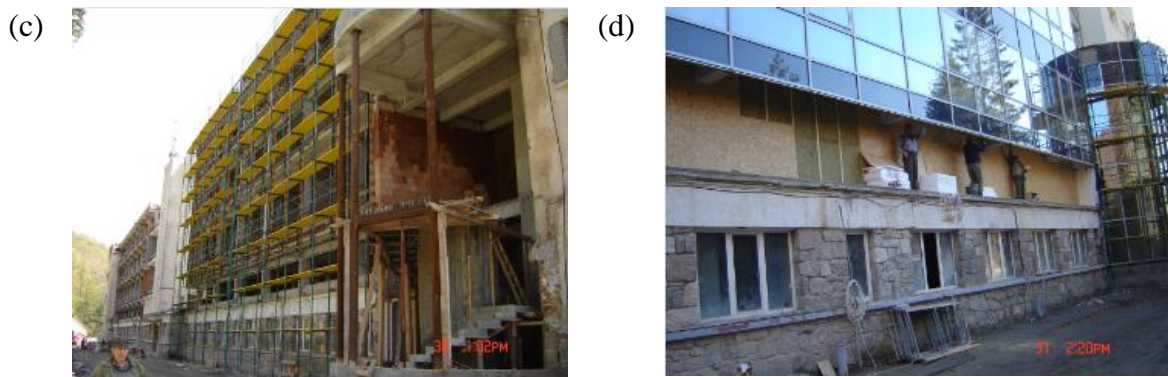


Fig. 6.27 Imagini ale clădirii 1.B efectuate pe parcursul execuției lucrărilor de extindere și renovare din 2007:
(a) Pereți interiori zidărie cărămidă plină; (b) Dispunere termo-hidroizolație peste planșeu din lemn et. 4;
(c) Extindere clădire – fațada Nord; (d) Perete ext. de închidere sp. tehnic peste mezanin

Cele mai reprezentative imagini termografice efectuate în cadrul vizitei pe amplasament sunt prezentate în figurile Fig. 6.28, Fig. 6.29 și Fig. 6.30.

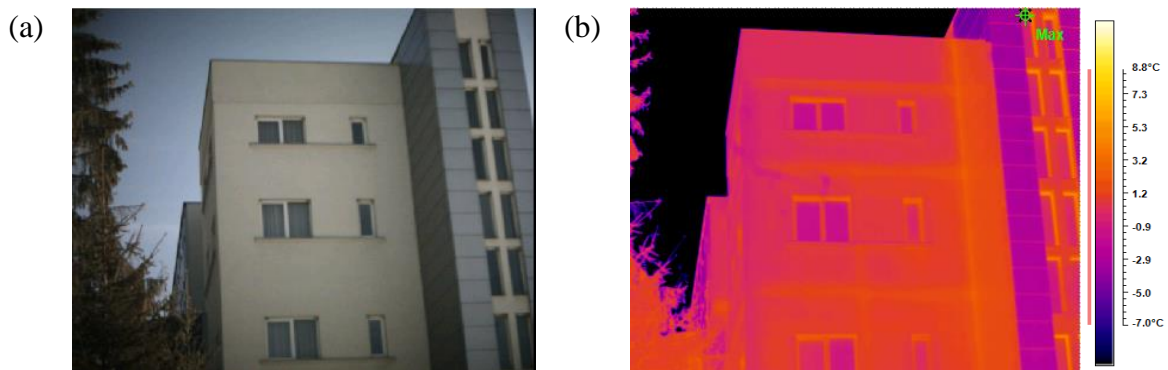


Fig. 6.28 Suprafața exterioră a pereților de pe fațada Vest
(a) imagine în vizibil
(b) hartă termografică

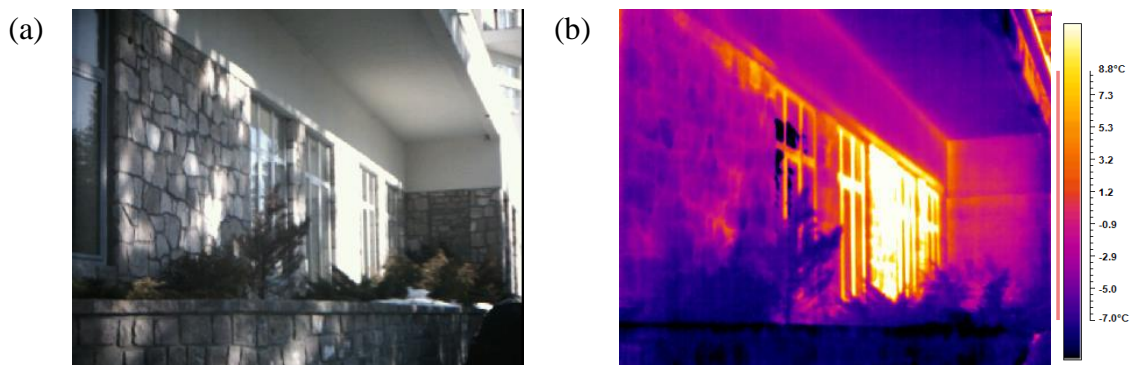


Fig. 6.29 Suprafața exterioră a pereților de pe fațada Sud
(a) imagine în vizibil
(b) hartă termografică

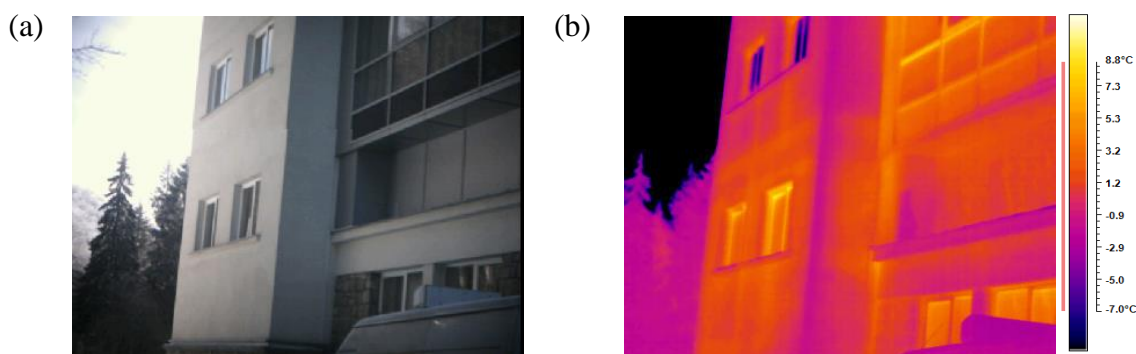


Fig. 6.30 Suprafața exterioară a pereților de pe fațada Nord
(a) imagine în vizibil (b) hartă termografică

Aspecte identificate privind starea tehnică a clădirii

Având în vedere vechimea clădirii și a faptului că proiectul inițial, elaborat în perioada interbelică, nu a existat la momentul efectuării studiului, atât pentru determinarea stării tehnice actuale ale clădirii, cât și pentru colectarea a cât mai multe date tehnice din proiectul inițial, s-au utilizat următoarele metode și documentații puse la dispoziție de către managementul hotelului:

- *investigare vizuală;*
- *termografiere în infraroșu;*
- Poze șantier din 2007;
- Expertiza tehnică și Studiul geotehnic efectuate pentru Proiectul din 2007;
- Discuții cu șeful de șantier care a supervizat extinderea și modernizarea clădirii în 2007.

S-a constatat că, cu excepția acoperișului de tip terasă necirculabilă de la cota +16.75 m, celelalte elemente ale anvelopei clădirii nu sunt izolate termic.

Din punct de vedere vizual clădirea este corespunzătoare. Nu s-au observat fenomene de condens superficial și structural. Având în vedere vechimea construcției, pentru calculul caracteristicilor termotehnice ale elementelor anvelopei conductivitățile termice ale materialelor au fost afectate de coeficienți de majorare.

6.2.3.3 Analiza performanței termice a elementelor anvelopei clădirii

Caracteristicile geometrice și termice ale clădirii s-au determinat conform precizărilor din subcap. 6.2.2.3. Pentru detaliile constructive neidentificabile în cataloagele de punți termice existente s-au efectuat simulări numerice. Câteva detalii constructive analizate sunt prezentate mai jos în Fig. 6.31, Fig. 6.32, Fig. 6.33 și Fig. 6.34.

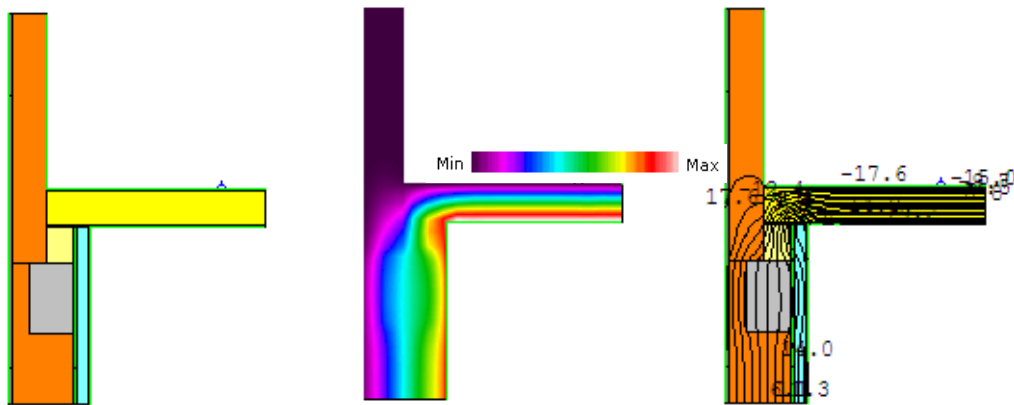


Fig. 6.31 Detaliu vertical - intersecție atic zidărie cărămidă cu planșeu de lemn, cota +16.75 m
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

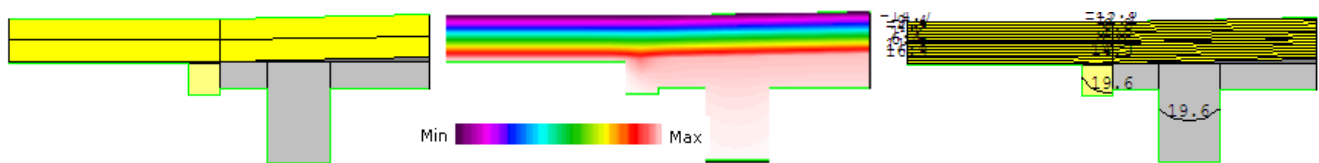


Fig. 6.32 Detaliu vertical - intersecție planșeu din beton armat cu planșeu din lemn, cota +16.75 m
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

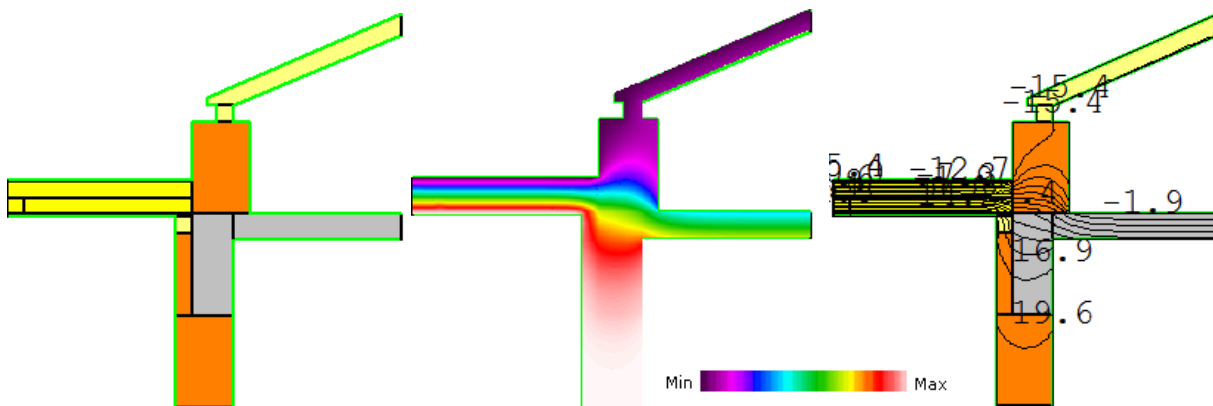


Fig. 6.33 Detaliu vertical - intersecție planșeu sub pod neîncălzit cu planșeu terasă din lemn, cota +16.75 m
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

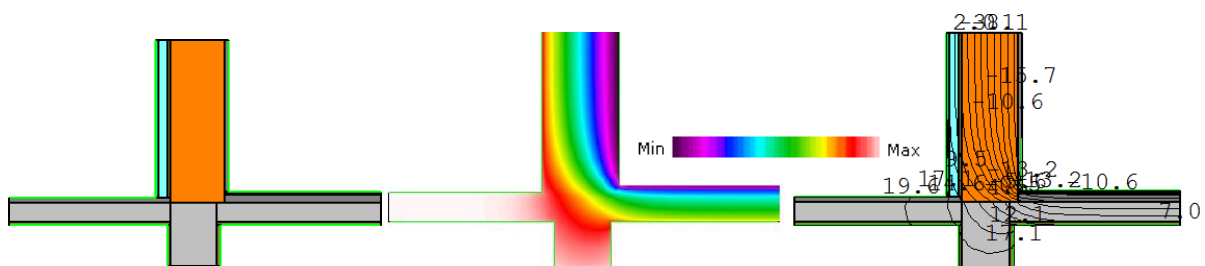


Fig. 6.34 Detaliu vertical - intersecție perete exterior cu planșeu din beton armat peste cota: +9.64 m
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

Prin utilizarea coeficienților liniari de transfer termic determinați numeric sau preluați din cataloage de punți termice, unde a fost posibil, s-a calculat performanța termică sub forma rezistențelor termice corectate, pe tip de element constructiv, pentru fiecare zonă de calcul a clădirii, rezultatele obținute fiind centralizate în Tab. 6.13, Tab. 6.14 și Tab. 6.15.

Tab. 6.14 Studiu de caz 1.B: Caracteristici geometrice și termice Zona 1 (stg.) / Zona 2 (dr.)

Element construcție/ Orientare	A [m ²]	R [m ² K/W]	r [-]	R' [m ² K/W]
Per ext N (54cm)	41.31	0.509	0.76	0.387
Per ext N (35cm)	4.26	0.646	0.9	0.581
Fer ext N (PVC)	9.34	0.49	-	0.49
Per ext E (85cm)	6.74	0.515	-	0.515
Per ext E (54 cm)	36.96	0.509	0.967	0.492
Per ext E (35cm)	5.36	0.668	0.65	0.434
Per ext E (54zid)	6.57	0.989	0.796	0.787
Fer ext E (PVC)	4.08	0.49	-	0.49
Per ext S (54cm)	66.36	0.509	0.78	0.397
Per ext S (85cm)	2.99	0.401	0.99	0.401
Fer ext S (Al)	58.52	0.9	-	0.9
Per ext S (40cm)	70.52	0.989	0.774	0.765
Per ext V (piatra45cm)	4.84	0.691	0.99	0.691
Pl. terasa (+1.64m)	54.53	0.572	1.07	0.612
Per. ext N (45piatra)	16.63	0.691	0.8	0.553
Per. pam N (54cm)	70.55	0.464	-	1.04
Pl. sol (-)	480.7	2.301	-	4.145
Per. sol (-3.36/-2.26m)	3.6	0.464	-	0.99
Per. int. neinc. (CS)	31.97	0.607	0.9	0.546
Pl. subsol neinc. (-)	45.62	0.396	0.9	0.356
Per. int. neinc. (subsol)	14.75	0.464	0.9	0.418

Element construcție/ Orientare	A [m ²]	R [m ² K/W]	r [-]	R' [m ² K/W]
Per ext N (54cm)	12.31	0.509	0.72	0.366
Per ext S (54cm)	70.37	0.509	0.85	0.433
Fer ext S (Al)	66.68	0.9	-	0.9
Per ext S (GVP acces)	12.73	0.932	0.85	0.792
Per ext S (zid54cm)	67.4	0.989	0.675	0.668
Per ext V (54cm)	7.99	0.509	0.805	0.41
Per ext V (40cm)	3.59	0.989	0.72	0.712
Pl ter (windfang)	16.22	0.572	1.12	0.641
Pl ter (+1.64m)	54.27	0.572	1.06	0.606
Per pam N (54cm)	66.36	0.464	-	1.22
Pl sol (-)	507.69	2.301	1.715	3.946
Per int neinc (depozit)	28.59	0.808	0.9	0.727

Tab. 6.15 Studiu de caz 1.B: Caracteristici geometrice și termice Zona 3 (stg.) / Zona 4 (dr.) / Zona 7 (dr. jos)

Elem. construcție / Orientare	A [m ²]	R [m ² K/W]	r [-]	R' [m ² K/W]
Per ext N (piatra 40cm)	10.64	0.691	0.68	0.47
Fer ext N (PVC)	2.56	0.49	-	0.49
Per ext S (54cm)	39.28	0.509	0.742	0.378
Per ext S (zid54cm)	28	0.989	0.894	0.884
Fer ext S (Al)	25.21	0.9	-	0.9
Per ext SV (54cm)	3.29	0.509	0.742	0.378
Per ext SV (zid54cm)	5.44	0.989	0.894	0.884
Fer ext SV (Al)	4.56	0.9	-	0.9
Per ext V (54cm)	8.84	0.509	0.808	0.411
Per ext V (zid54cm)	3.98	0.989	0.71	0.702
Fer ext V (Al)	2	0.9	-	0.9
Per ext V (pl.piatra 45cm)	27.03	0.691	0.78	0.539
Panou opac PVC (-)	1.36	0.39	1	0.39
Fer ext V (PVC)	2.64	0.49	-	0.49
Per pamN (40cm b.a)	46.22	0.464	-	1.22
Pl sol (-)	237.5	2.3	-	3.404
Per pam (dif 2.40-3.36)	10.55	0.464	-	0.86
Per neinc (depozite)	80.84	0.808	0.9	0.727
Per int CS E (30cm)	40.27	0.606	0.9	0.545

Elem. construcție / Orientare	A [m ²]	R [m ² K/W]	r [-]	R' [m ² K/W]
Pl ter (cota +3.37)	9.35	0.239	1.304	0.312
Per ext N (54cm)	61.54	0.509	0.707	0.36
Per ext N (zid54cm)	27.12	0.989	0.715	0.707
Usa vitr N (Al)	3.52	0.9	-	0.9
Fer ext N (PVC)	27.98	0.49	-	0.49
Pl spatiu teh 2 (-)	235.2	0.282	1.16	0.327

Elem. construcție / Orientare	A [m ²]	R [m ² K/W]	r [-]	R' [m ² K/W]
Per ext Est (85cm)	23.85	0.427	-	0.427
Per ext Nord (85cm)	13.27	0.427	-	0.427
Fer ext Sud (PVC)	1.42	0.5	-	0.5
Fer curte Sud (PVC)	6.37	0.5	-	0.5
Per ext Sud (85cm)	17.24	0.427	-	0.427
Per curte S (85 cm)	31.16	0.469	-	0.469
Per pamant (50cm)	37.02	0.551	-	1.33
Per pamant (85 cm)	7.59	0.502	-	0.9
Pl sol (-)	122	0.583	-	4.08
Per int neinc (40 cm)	20.19	0.453	-	0.453

Tab. 6.16 Studiu de caz 1.B: Caracteristici geometrice și termice Zona 5 (stg.) / Zona 6 (dr.)

Elem. Construcție / Orientare	A [m ²]	R [m ² K/W]	r [-]	R' [m ² K/W]	Elem. construcție / Orientare	A [m ²]	R [m ² K/W]	r [-]	R' [m ² K/W]
Per ext N (35cm capete)	91.51	0.669	0.814	0.545	Fer PVC Est (-)	12	0.52	-	0.52
Fer ext N (PVC capete)	10.58	0.49	-	0.49	Fer PVC Nord (-)	35.11	0.52	-	0.52
Per ext N (54cm)	98.35	0.509	0.642	0.327	Fer PVC Vest (-)	11.2	0.52	-	0.52
Per ext N (zid54cm)	38.68	0.989	0.542	0.536	Fer PVC Sud (-)	251.53	0.52	-	0.52
Usi vitrate N (Al)	8.04	0.9	-	0.9	Fer PVC SE (-)	33.68	0.52	-	0.52
Fer ext N (PVC)	32.74	0.49	-	0.49	Fer PVC SV (-)	33.68	0.52	-	0.52
Fer ext N (metalice CS)	2.17	0.37	-	0.37	Fer metalice N (CS)	10.8	0.3	-	0.322
Per cortina NE (-)	15.88	0.9	-	0.9	Per cortina N (c nou)	676.97	0.9	-	0.9
Per cortina N (-)	20.78	0.9	-	0.9	Per cor N (c vechi)	36.75	0.9	-	0.9
Per cortina NV (-)	15.88	0.9	-	0.9	Per cortina N (Circ)	9.06	0.9	-	0.9
Per ext V (35cm)	23.21	0.669	0.879	0.588	Per cortina NE (Circ)	9.06	0.9	-	0.9
Fer ext V (PVC)	4.79	0.49	-	0.49	Per cortina NV (circ)	9.06	0.9	-	0.9
Fer ext SV (pvc)	8.3	0.49	-	0.49	Per ext N (35cm)	264.57	0.669	0.84	0.562
Per ext SV (40cm)	19.92	0.832	0.879	0.731	Per ext E (35cm)	96.45	0.669	0.862	0.577
Per ext V (40cm)	21.19	0.832	0.92	0.765	Per ext V (35cm)	118.61	0.669	0.923	0.617
Per ext S (40cm)	277.55	0.832	0.749	0.623	Per ext V (lift)	55.67	0.793	0.85	0.674
Fer ext S (PVC)	126.45	0.49	-	0.49	Per ext E (40cm)	56.42	0.832	0.862	0.717
Per SE (40cm)	12.37	0.832	0.885	0.736	Per ext N (40cm)	65.98	0.832	0.848	0.706
Fer ext SE (PVC)	5.45	0.49	-	0.49	Per ext V (40cm)	58.03	0.832	0.923	0.768
Per ext E (40cm)	27.93	0.832	0.885	0.736	Per ext S (40cm)	671.97	0.832	0.747	0.622
Per ext E (35cm)	30.65	0.669	0.885	0.592	Per ext SE (40cm)	75.94	0.832	0.747	0.622
Fer ext E (PVC)	3.3	0.49	-	0.49	Per ext SV (40cm)	75.94	0.832	0.747	0.622
Pl terasa (wfang)	19.1	0.318	-	0.318	Pl ter b.a. (+16.75m)	334.14	5.281	0.77	4.066
Pl ter Acc princ (+5.64m)	10.32	0.572	1.09	0.623	Pl ter lemn (+16.75m)	673.52	5.181	0.98	5.077
Pl ter laterale (+5.64m)	236.65	0.572	1.05	0.601	Pl ter b.a. (+9.64m)	6.39	0.356	1.24	0.441
Pl ext sala expo (+3.30m)	7.53	0.239	1.304	0.312	Pl ext consola (+5.64m)	46.61	2.597	1.01	2.597
Pl sol (-)	182.56	2.887	-	2.826	Per rost nou2.1 (GVP)	56.23	0.891	0.799	0.712
Per neinc (Lift_ext)	37.33	0.67	1	0.67	Per rost vechi2.1 (-)	56.23	0.669	0.9	0.602
Per neinc CS (Vest)	32.58	0.606	0.9	0.545	Per rost nou2.1 (GVP)	69.36	0.891	0.799	0.712
Per neinc CS (Est)	28.32	0.606	0.9	0.545	Per rost vechi2.2 (-)	69.36	0.669	0.9	0.602
Pl neinc (Sp Teh)	189.63	0.282	1.16	0.327	Per int neinc (lift pano)	32.27	0.775	1	0.775
Per neinc (Sp Teh)	97.04	0.606	0.9	0.545	Per int neinc (CS Vest)	59.19	0.671	0.9	0.604
Per neinc (Sp Teh2)	113.07	0.606	0.9	0.545	Per int neinc (CS Est)	72.39	0.671	0.9	0.604
Pl subsol neinc (depozite)	57.82	0.323	0.9	0.291	Pl ter neinc (+16.75m)	39.11	0.345	0.98	0.338
					Pl neinc pod (+16.75m)	198.86	0.345	0.98	0.338
					Pl neinc (+5.64m sp.t2)	235.2	0.282	1.16	0.327
					Pl neinc (CS Est)	7.34	0.324	1	0.324
					Pl neinc +5.64m (sp.t1)	189.63	0.282	1.16	0.327

Tab. 6.17 Alți parametrii de calcul termotehnic ai clădirii 1.B

Parametrii	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
A _e [m ²]	1036.23	914.20	580.21	364.71	1886.48	4854.23	280.11
V [m ³]	2542.96	2246.91	1096.94	824.13	5185.59	13874.35	385.52
n _a [h ⁻¹]	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Se face precizarea că în clădire nu există echipamente de tip CTA (centrală de tratare aer).

6.2.3.4 Analiza performanței energetice a clădirii

Parametrii climatici – Intensitatea radiației solare și temperaturile exterioare medii lunare

Intensitățile radiației solare au fost stabilite în conformitate cu MC 001/2006-PI, Anexa A.9.6 [4], pentru localitatea Târgu Secuiesc care este cea mai apropiată localitate față de amplasamentul hotelului, loc. Balványos (23 km), pentru care nu există date naționale ale intensității radiației solare în MC001/2006.

Temperaturile exterioare medii lunare au fost stabilite în conformitate cu SR 4839/2014 [158], pentru localitatea Târgu Secuiesc.

Temperatura interioară de calcul

Corelat cu zonele luate în considerare în analiza clădirii, s-a determinat temperatura interioară medie volumică, cu relația (6-4), indicată în subcap. 6.2.2.4. Pentru zonele de calcul luate în considerare, rezultă următoarele temperaturi:

Zona 1: Restaurant + bucătărie	$\Theta_i = 17.92 \text{ }^\circ\text{C}$
Zona 2: Recepție/lobby + bar	$\Theta_i = 17.67 \text{ }^\circ\text{C}$
Zona 3: Zona Corp A - parter	$\Theta_i = 18.52 \text{ }^\circ\text{C}$
Zona 4: Săli de conferințe	$\Theta_i = 17.87 \text{ }^\circ\text{C}$
Zona 5: Zona expoziție (deschisă) + cazare etaj 1	$\Theta_i = 18.81 \text{ }^\circ\text{C}$
Zona 5: Zona expoziție (deschisă) + cazare etaj 1	$\Theta_i = 19.57 \text{ }^\circ\text{C}$
Zona 7: Zona subsol parțial, anexe bucătărie	$\Theta_i = 13.31 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura interioară a spațiilor neîncălzite

S-a efectuat bilanțul temperaturilor următoarele spații neîncălzite (zone secundare) care există în această clădire:

- casele scării amplasate pe laturile Est, Vest ale clădirii, parțial în contact cu exteriorul - vezi Fig. 6.35 și Fig. 6.36;
- spațiile tehnice, care au rezultat în urma extinderii clădirii cu cele două corpuri integrate în ansamblul clădirii (deasupra zonei expoziționale și deasupra sălilor de conferințe, de la mezanin) – vezi Fig. 6.37 și Fig. 6.38;
- depozite parțial îngropate în pământ, sub zona expozițională – vezi Fig. 6.39;
- puț lift panoramic, amplasat în exteriorul clădirii, pe fațada Nordică – vezi Fig. 6.40.

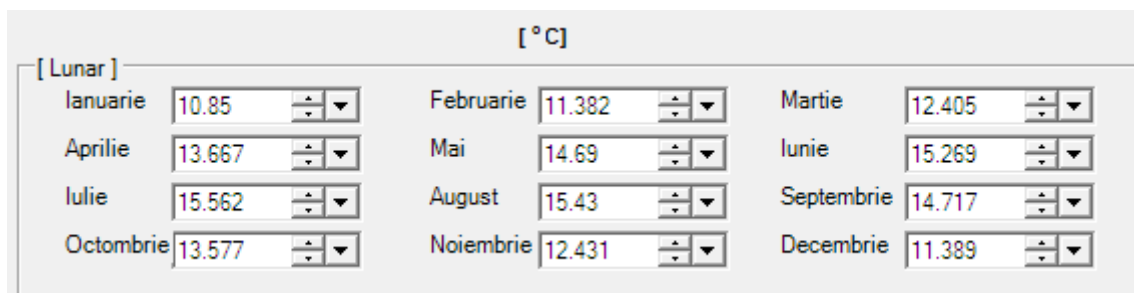


Fig. 6.35 Temperaturi în spațiul neîncălzit 1: Casa scării Est

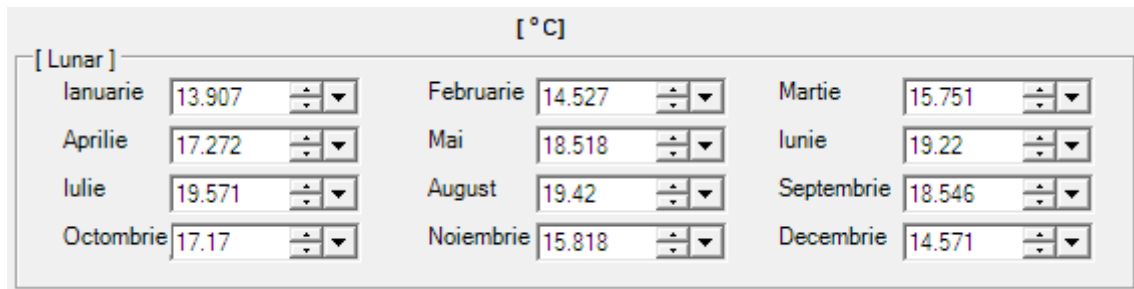


Fig. 6.36 Temperaturi în spațiul neîncălzit 2: Casa scării Vest

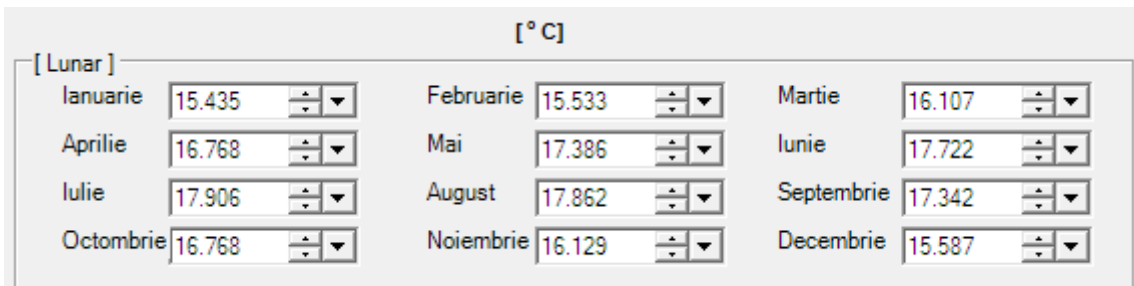


Fig. 6.37 Temperaturi în spațiul neîncălzit 3: Spațiu tehnic între mezanin și etaj 1 (deasupra sălii conferințe)

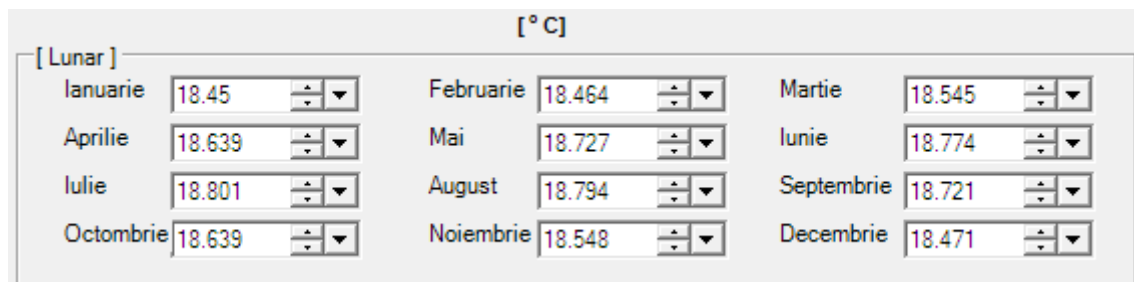


Fig. 6.38 Temperaturi în spațiul neîncălzit 4: Spațiu tehnic între mezanin și etaj 1 (deasupra zonă expozițională)

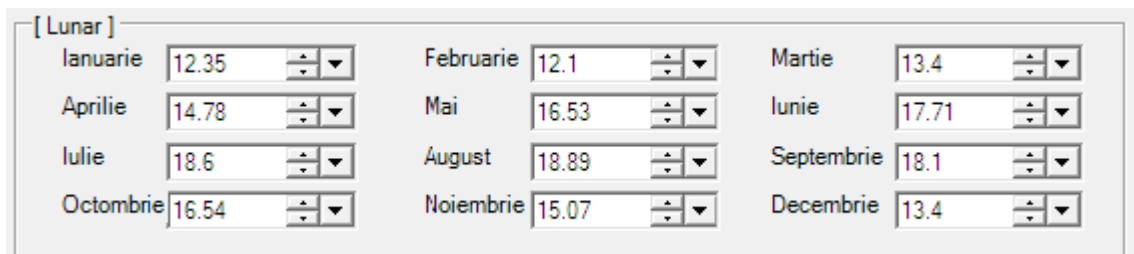


Fig. 6.39 Temperaturi în spațiul neîncălzit 5: Depozite neîncălzite, sub zona expozițională

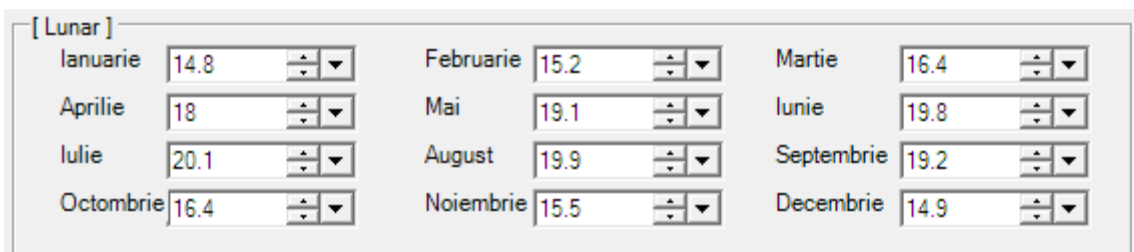


Fig. 6.40 Temperaturi în spațiul neîncălzit 6: Puț lift panoramic de pe latura nordică a clădirii

Calculul necesarului de încălzire al clădirii

Necesarul de căldură anual pentru încălzire a fost determinat în același mod ca și pentru clădirea 1.A, o descriere a metodei fiind făcută în subcap. 6.2.2.4.

Modelul de calcul utilizat este multizonal, iar împărțirea pe zone este următoarea:

- 7 zone principale: zona restaurant + bucătărie (parter), zona recepție/lobby + bar (parter), zona Corp A (parter), zona săli de conferințe (mezanin), zona expozițională (deschisă) + cazare etaj 1 (mezanin + etaj 1), zona cazare (Etaje 2, 3, 4), zona anexa bucătărie (subsol parțial);
- 6 zone secundare, formate din: casele scărilor, spații tehnice, depozite neîncălzite, puț lift, care sunt adiacente zonelor principale și spre care rezultă pierderi de flux termic pe durata de încălzire a clădirii.

Privitor la calculul multizonal se face precizarea că limitele care separă zonele principale de calcul în interiorul clădirii sunt considerate limite adiabatice.

În Tab. 6.18 sunt centralizate principalele rezultate obținute în analiza energetică multizonală și necesarul de energie pentru încălzire obținut.

Tab. 6.18 Studiu de caz 1.B: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea reală

Zona	Rs	θ_{io}	θ_{iRS}	Dz	Ngz	Ngz*	Ngz*/Ngz	Q_{inc}^{an}
Zona 1	0.927	17.92	16.156	245	2360	2137	0.91	95864.61
Zona 2	1.221	17.67	14.298	219	2093	-	-	67897.24
Zona 3	0.959	18.52	17.238	256	2289	-	-	50122.40
Zona 4	0.358	17.87	16.655	243	1224	489	0.40	15972.19
Zona 5	0.539	18.81	16.704	236	1920	-	-	253106.37
Zona 6	0.689	19.57	17.083	261	2530	-	-	716350.61
Zona 7	0.875	13.31	12.637	165	1372	-	-	13465.34
Total:								768641.38

Clădirea de referință

S-a refăcut calculul cu parametrii clădirii de referință, pe zone, rezultatele obținute fiind centralizate în Tab. 6.19.

Tab. 6.19 Studiu de caz 1.B: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea de referință

Zona	Rs	θ_{io}	θ_{iRS}	Dz	Ngz	Ngz*	Ngz*/Ngz	Q_{inc}^{an}
Zona 1	1.773	17.92	14.889	238	2176	2067	0.95	53599.58
Zona 2	1.928	17.67	12.664	213	1790	-	-	38865.45
Zona 3	2.077	18.52	16.099	245	2049	-	-	23555.18
Zona 4	2.127	17.87	12.657	206	2736	1213	0.44	9181.49
Zona 5	1.015	18.81	15.056	226	1365	-	-	100334.95
Zona 6	1.07	19.57	15.794	228	2261	-	-	418737.40
Zona 7	1.624	13.31	12.139	195	1484	-	-	8411.67

6.2.3.5 Soluții și detalii optimizate energetic, analiza tehnico-economică

Din considerente de nealterare a arhitecturii actuale, pe pereții exteriori din piatră se propune dispunerea unui strat de material termoizolant la partea interioară a peretelui. Pentru aceasta soluție propusă s-a realizat, suplimentar, un calcul la condens în vederea controlului umidității în interiorul clădirii.

Pentru clădirea auditată au fost analizate următoarele soluții de izolare termică, al căror efect în performanța termică a elementelor anvelopei sunt descrise în Tab. 6.20.

Tab. 6.20 Studiu de caz 1.A: Performanțe termice ale elementelor anvelopei după termoizolare

Tipul elementului de construcție	Măsurile analizate și propuse pentru termoizolare anvelopă clădire		Transmitanță termică corectată U'
			[W/(m ² K)]
Pereți exteriori din piatră, 54 cm grosime	Var. 1-3	Termoizolație, la interior, cu 6 cm vată minerală, $\lambda = 0.036$ W/(m·K), cu bariera de vapori, obligatoriu dispusă la fața caldă a termoizolației	var. 0.614-0.953
Pereți exteriori din zidărie de cărămidă, 54 cm grosime	Var. 1-3	Termoizolație, la interior, cu 6 cm vată minerală, $\lambda = 0.036$ W/(m·K), cu bariera de vapori, obligatoriu dispusă la fața caldă a termoizolației	var. 0.399-0.773
Pereți exteriori din zidărie de cărămidă placați cu piatră, 45 cm grosime	Var. 1-3	Termoizolație, la interior, cu 6 cm vată minerală, $\lambda = 0.036$ W/(m·K), cu barieră de vapori, obligatoriu dispusă la fața caldă a termoizolației	var. 0.581-0.655
Pereți exteriori din zidărie de cărămidă 35 cm și 40 cm grosime	Var. 1	Termoizolație exterioară cu 10 cm polistiren expandat grafitat, $\lambda = 0.036$ W/(m·K)	var. 0.360-0.536
	Var. 2	Termoizolație exterioară cu 10 cm polistiren expandat grafitat, $\lambda = 0.036$ W/(m·K)	var. 0.270-0.575
	Var. 3	Termoizolație exterioară 15 cm polistiren expandat, $\lambda = 0.040$ W/(m·K), $\rho > 16$ kg/m ³	var. 0.298-0.586
Terasa exterioară circulabilă	Var. 1-3	Termoizolație interioară 10 cm vată minerală sub placa de beton, $\lambda = 0.036$ W/(m·K), cu barieră de vapori	var. 0.298-0.375
Terasa exterioară necirculabilă	Var. 1-3	Termoizolație exterioară 20 cm polistiren expandat, $\lambda = 0.040$ W/(m·K), $\rho > 16$ kg/m ³	0.191
Planșeu sub pod neîncălzit	Var. 1-3	Strat continuu de 20 cm vată minerală peste placa de beton	0.196
Planșeu sub spațiu tehnic neîncălzit – et. 5	Var. 1-3	Termoizolație interioară cu 10 cm polistiren expandat, sub placa de beton	0.358

Pentru obținerea performanțelor termice indicate în Tab. 6.20, s-a efectuat optimizarea detaliilor constructive, cu scopul reducerii influenței punților termice, printr-o conformare care

să asigure reducerea transferului de flux termic. Conformarea propusă și rezultatele grafice ale simulărilor numerice sunt prezentate pentru câteva detalii constructive în Fig. 6.41 și Fig. 6.42.

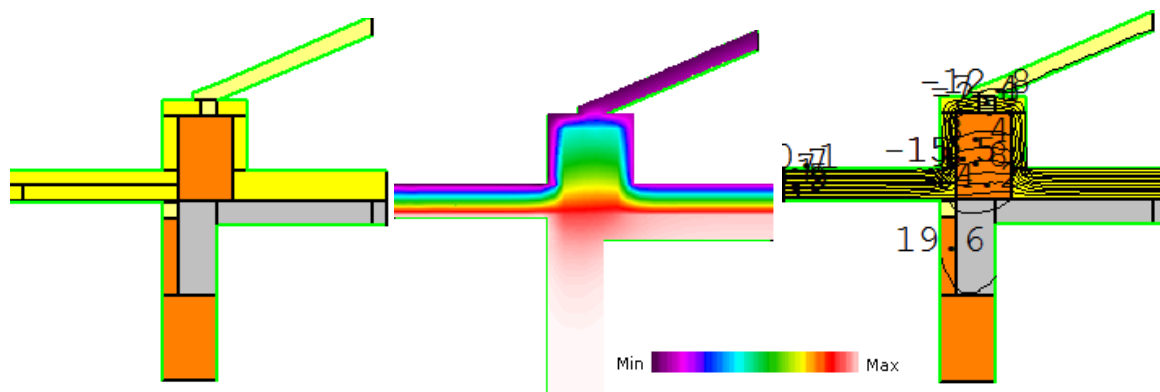


Fig. 6.41 Detaliu vertical optimizat - intersecție planșeu sub pod neîncălzit cu pl. terasă din lemn, cota +16.75 m
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

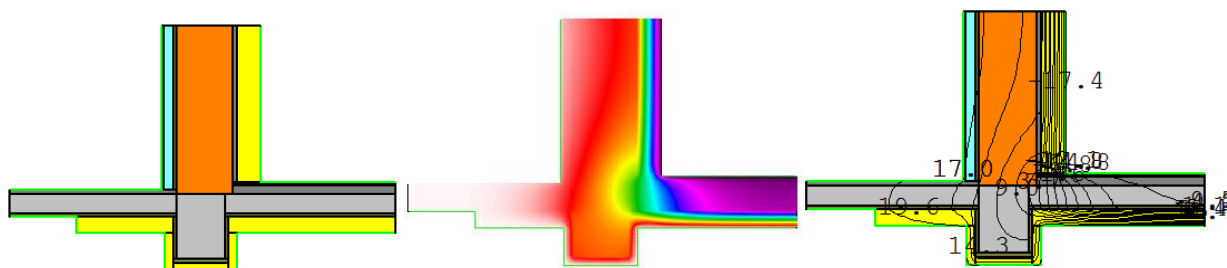


Fig. 6.42 Detaliu vertical optimizat - intersecție perete exterior cu planșeu din beton armat peste cota: +9.64 m
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

Tot cu scopul reducerii consumurilor de energie pentru încălzire au fost propuse *măsuri care țin de modul de utilizare al clădirii de către utilizator*. În urma vizitei clădirii și în urma discuțiilor avute cu personalul implicat în exploatarea clădirii s-a constatat că utilizarea zonei de cazare nu este eficientă din punct de vedere energetic. Potrivit personalului administrativ din hotel, camerele sunt utilizate în conformitate cu preferința clienților, ceea ce înseamnă că acestea sunt utilizate aleatoriu, astfel încât se pot identifica pierderi termice dinspre camerele încălzite spre camerele care nu sunt încălzite, care pot fi reduse.

Astfel, deoarece în baza analizei istoricului de ocupare al zonei de cazare s-a observat că gradul de ocupare al hotelului este relativ scăzut (18.70% - la nivelul anului 2014), s-a recomandat să se utilizeze o zonă compactă de camere (alăturate) care deservește clienții hotelului (de exemplu, doar camerele de la etajul 1) pentru a reduce pierderile de căldură prin pereții, respectiv prin planșeele camerelor alăturate celor încălzite pentru o perioadă limitată de timp.


Analiza financiară și a economiei de energie a proiectului

În Tab. 6.22 Tab. 6.23 și Tab. 6.24 s-au făcut diverse analize care permit evaluarea fezabilității implementării măsurilor propuse.

Tab. 6.21 Studiu de caz 1.B: Analiza tehnico-economică 1

Consum actual				Economii		
An	[MWh]	[t.e.p.]	[Euro]	[MWh]	[t.e.p.]	[Euro]
2014	829.9	71.29	25818	262	22.52	6614

Izolarea termică a clădirii și eliminarea pierderilor prin neetanseități



68.42%
31.58%

■ Economii estimate ■ Consum în după implementarea soluției

Tab. 6.22 Studiu de caz 1.B: Analiza tehnico-economică 2

Soluția de eficientizare	Izolarea termică a clădirii			
	[-]	En. Electrică [kWh/an]	Gaz metan [kWh/an]	Total
Economii de energie	Zona 1	0	28565	28565
	Zona 2	0	21211	21211
	Zona 3	0	16989	16989
	Zona 4	0	98961	98961
	Zona 5	0	7134	7134
	Zona 6	0	89231	89231
	Total [kWh]	0	262091	262091
	Economii de energie raportat la consumator		En. Electrică	Gaz metan
	[%]	0.00%	31.60%	31.60%
Economii de energie raportat la consumul total al hotelului		En. Electrică	Gaz metan	Total
	[%]	0.00%	19.70%	15.60%
Reducere emisii CO2	[kg CO2/an]	57660		
Reducere emisii CO2 din total	[%]	11.02%		
Economii	[€/an]	6614		
Cost echipamente	[€]	31490		
Pondere manoperă	[%]	40%		
Cost manoperă	[€]	20993		
Investiție	[€]	52483		
Perioada simplă de recuperare a investiției	[an]	7.9		

Tab. 6.23 Studiu de caz 1.B: Analiză tehnico-economică 3

Soluție	Izolarea termică a clădirii		
Investiție [Euro]	52483		
Durata de viață [an]	20		
Economie Soluție		anuală	perioada de viață
	kWh	262091	5241818
	euro	6614	132282
KPI Euro investit/MWh economisit			10.01

Tab. 6.24 Studiu de caz 1.B: Indicatori economici

Nr. crt.	Soluție tehnică	Investiție	ECO	VNA	RIR	PSR
		[Euro]	[Euro/an]	[Euro]	[%]	[an]
1	Izolarea termică a clădirii	52483	6614	27449	10.80%	7.9

Având în vedere că acest proiect reprezintă munca unui colectiv de specialiști, s-au considerat de interes rezultatele întregii echipe, inclusiv pe specializările instalații, inginerie electrică, automatizări, surse regenerabile de energie, astfel că în Fig. 6.43 și Tab. 6.25 sunt prezentate rezultatele proiectului neZEH.

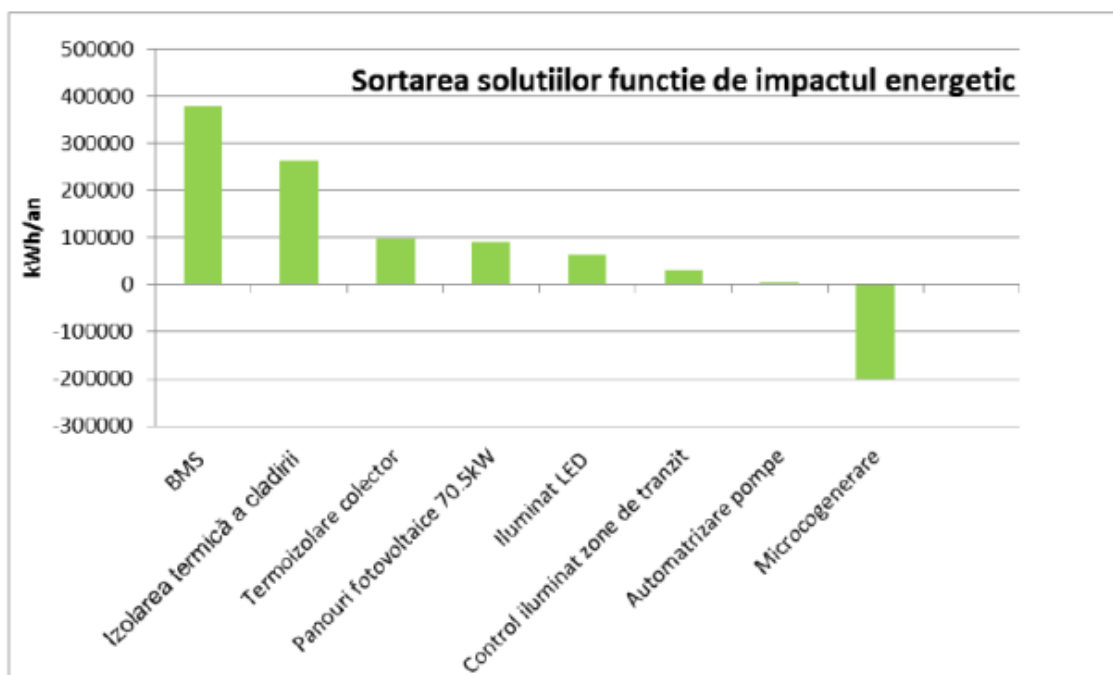


Fig. 6.43 Economii de energie cu pachetul de măsuri propuse pentru modernizarea Clădirii 1.B

Tab. 6.25 Cuantificare economii de energie și financiare totale pe pachetul de măsuri global în clădirea 1.B

Consum actual total Hotel				Economii en. totale		
An	[MWh]	[t.e.p.]	[Euro]	[MWh]	[t.e.p.]	[Euro]
2014	1678.5	144.20	67837	1416	121.63	50561

Saving de energie pachet global

15.65%

84.35%

■ Economii estimate ■ Consum en. după implementare pachetului

Maximul de economie cuantificată pentru Clădirea 1.B este de 1,415,776 kWh/an, adică 84.3% din consumul total actual. Perioada simplă de recuperare a investițiilor este de 9.7 ani.

6.3 Inițiative de implementare NZEB în clădiri existente la nivel național – Studiu de caz 2: Spitale județene transformate în NZEB

6.3.1 NZEB în România în clădiri publice existente

La ora actuală, la nivel național există finanțări disponibile din fonduri europene pentru clădirile existente din sectorul public nerezidențial, care nu au fost proiectate inițial sub cerințe de înaltă performanță energetică, însă care permit renovări majore ale clădirii, obținerea finanțării fiind condiționată de atingerea în exploatare a unor indicatori care să permită încadrarea clădirii în conceptul de *nearly zero energy building* (NZEB). O inițiativă laudabilă în acest sens este reprezentată de Axa prioritară 3 – „Sprijinirea tranziției către o economie cu emisii scăzute de carbon”, Prioritatea de investiții 3.1 – “Sprijinirea eficienței energetice, a gestionării inteligente a energiei și a utilizării energiei din surse regenerabile în infrastructurile publice, inclusiv în clădirile publice, și în sectorul locuințelor”, Operațiunea B – Clădiri Publice în cadrul POR (Programul Operațional Regional) 2014-2020 [164].

Următorul studiu de caz a fost elaborat în anul 2017, urmărind transformarea unui spital județean existent în clădire al cărei consum de energie este aproape egal cu zero.

6.3.2 Studiu de caz 2

6.3.2.1 Descriere caracteristici clădire

Clădirea este Secția de Pneumologie a Spitalului Județean Mureș, fiind amplasată în municipiul Tg. Mureș, județul Mureș, având $S_{cd} = 3144 \text{ m}^2$ și regimul de înălțime: S+P+2E+Mp. Clădirea a fost construită în anul 1904.

Amplasarea clădirii:

- Zona climatică: IV, conform fig. III.1, *Zonarea climatică iarnă de calcul*, din MC 001-6/ 2013, $T_e = -21 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Zona eoliană: IV, conform STAS 10101/90;
- Clasa de adăpostire a clădirii: moderat adăpostită;
- Categoria de importanță a construcției: C.

Descrierea arhitecturală a clădirii și a structurii de rezistență

Destinația clădirii este de *spital clinic județean*, iar principalele funcțiuni ale clădirii sunt: bloc alimentar și sală de mese la demisolul clădirii, zonă de ambulatoriu cu secțiile Bronhologie și Radiologie, precum și un Laborator la parterul clădirii, zonă de spital cu pacienți internați, cu Secția de Copii amplasată la parterul clădirii și Secția de adulți amplasată la etajele 1 și 2. La mansarda parțială este amenajată camera de gardă.

Structura de rezistență a clădirii: este realizată din zidărie de cărămidă plină portantă, cu grosimi diferite. În ultimii ani s-a realizat închiderea a două terase, cu zidărie din BCA de grosime 30 cm.

Planșeele identificate sunt de mai multe tipuri, astfel: planșeul peste subsol este de două tipuri: din bolți de cărămidă în zona centrală, respectiv din profile metalice și bolțișoare de cărămidă pe lateralele clădirii; planșeele peste parter și etajul 1 sunt din beton armat monolit; planșeul peste etajul 2 este din lemn, cu grinzi dispuse interax la distanța de 1,00 m, cu înălțimea de 18 cm, podină și tavan din scandură de lemn de rășinoase, respectiv umplutură de moloz între ele. Peste podina de lemn este amplasat un strat de circulație din cărămidă plină cu grosimea de 5 cm.

Tâmplăriile exterioare sunt de mai multe tipuri, majoritatea foarte vechi, astfel s-au identificat: tâmplărie simplă din lemn, cu geam simplu (în zona subsol), respectiv un luminator de dimensiuni mari (1.18x6.08 m) dispus în zona casei scării, tot din tâmplărie simplă din lemn; tâmplărie dublă din lemn, cu geam dublu; tâmplărie PVC cu geam termoizolant dublu, montată la intervale de timp diferite, unele dintre ele fiind deja degradate, prezentând neetanșeități vizibile.

Finisajele pereților sunt realizate din tencuieli din mortar de var și placări cu faianță (în grupurile sanitare, dușuri).

Finisaje la pardoseli. În incinta clădirii sunt utilizate pardoseli gresie ceramică, mozaic, covor PVC.

Descrierea instalațiilor interioare și alcătuirea acestora

Instalații de încălzire - clădirea este alimentată cu căldură produsă de 3 cazane în condensatie Beretta Power Plus, putere termică 88.3 kW/cazan (80°/60°C), alimentate cu gaz metan care asigură agentul termic apă caldă, amplasate într-o cameră tehnică distinctă construită ulterior. Corpurile de încălzire sunt radiatoare din oțel.

Instalații de preparare apă caldă menajeră - apa caldă menajeră este asigurată de două boilere, combustibil gaz metan, amplasate în subsol: 1 x boiler Styleboiler EG/P 600, capacitate 600 l, 1 x boiler Coterm BG 600, capacitate 565 l.

Instalații de ventilare – climatizare - clădirea nu este dotată cu instalații de ventilare mecanică. Clădirea este dotată cu câteva echipamente de tip split care asigură climatizarea locală, la nivelul a câtorva încăperi din clădire.

Iluminatul se realizează cu aparate de iluminat de tip tuburi fluorescente și câteva corpuri de iluminat incandescente. Puterea electrică instalată pe iluminat este de 9.11 kW.

Regimul de ocupare al clădirii – clădirea are program de funcționare continuu.

6.3.2.2 Analiza vizuală și termografică

Câteva fotografii ale clădirii efectuate la investigarea vizuală sunt prezentate în Fig. 6.44.



Fig. 6.44 Imagini ale clădirii 2 (a) Fațada SE – fațada principală; (b) Fațada NV; (c) Acces secundar, fațada NV; (d) Planșeu terasă circulabilă peste parter; (e) Tencuială exterioară, fațada SE; (f) Pereți spre spațiu neîncălzit (dinspre casa scării spre pod); (g) Stratificație planșeu de pod

Câteva imagini termografice efectuate în cadrul investigației calitative a clădirii sunt prezentate în Fig. 6.45 și Fig. 6.46.

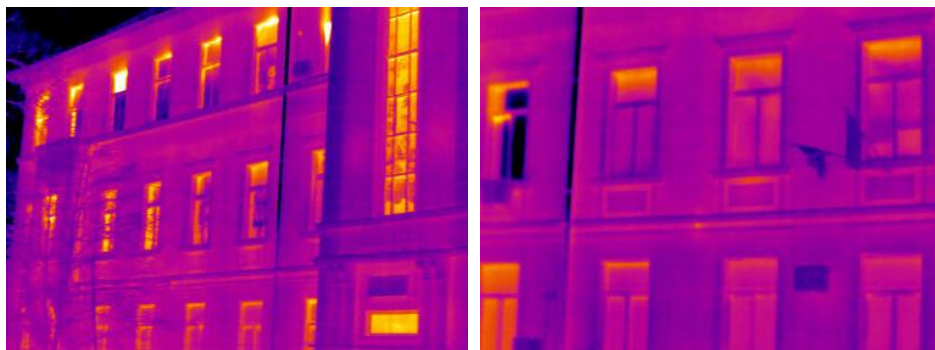


Fig. 6.45 Suprafața exterioră a pereților de pe fațada SE – imagini termografice

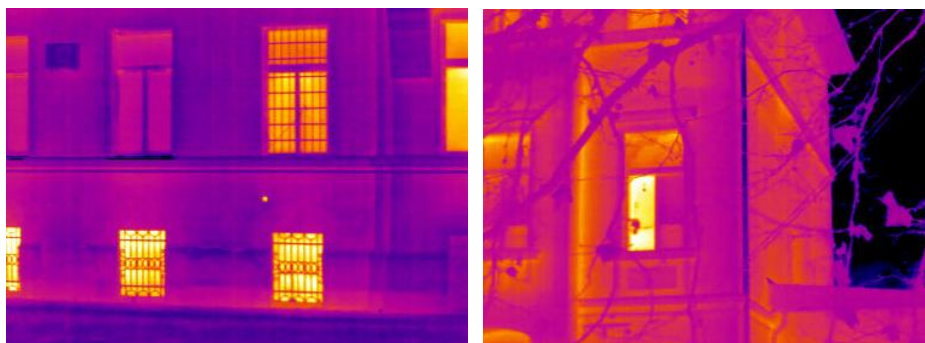


Fig. 6.46 Suprafața exterioră a pereților de pe fațada NV – imagini termografice

Aspecte identificate privind starea tehnică a clădirii

La inspecția vizuală s-au sesizat o serie de defecte pe care clădirea le-a acumulat de-a lungul timpului:

- Igrasie la unii pereți exteriori, în zona subsolului, cu tencuiala degradată local (scorjită și exfoliată), pe fațada Nord-Vest și pe fațada Nord-Est;
- Infiltrații de apă în pereții exteriori, în zona terasei peste parter (secția Bronhologie), pe fațada Nord-Vest;
- Tâmplărie simplă din lemn foarte veche și neetanșă (aproape toate încăperile de la subsol, dar care sunt încălzite) și luminatorul de la casa scării de dimensiuni 1.18 x 6.08 m;
- Tâmplărie PVC defectă în zona secției de Radiologie, care nu se închide etanș;
- Tâmplărie lipsă la o fereastră din subsol, în zona puțului liftului.

6.3.2.3 Analiza performanței termice a elementelor anvelopei clădirii

Caracteristicile geometrice și termice ale clădirii s-au determinat conform precizărilor din subcap. 6.2.2.3. Pentru detaliile constructive neidentificabile în cataloagele de punți termice existente s-au efectuat simulări numerice în regim staționar. Câteva detalii sunt prezentate în Fig. 6.47, Fig. 6.48, Fig. 6.49, Fig. 6.50, Fig. 6.51 și Fig. 6.52.

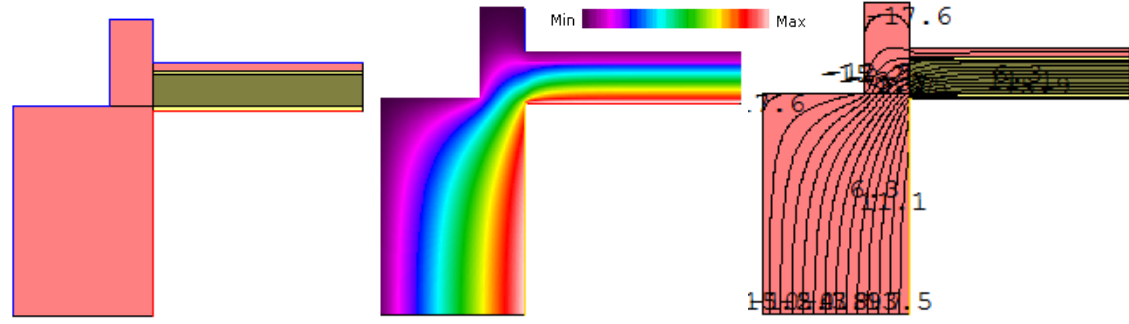


Fig. 6.47 Detaliu intersecție perete exterior P1 cu planșeu din lemn, sub pod P11 (secțiune verticală)
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

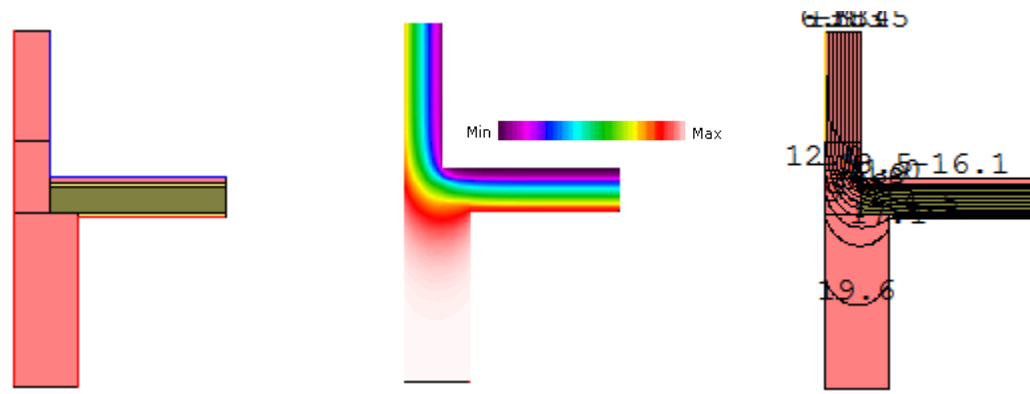


Fig. 6.48 Detaliu intersecție perete neîncălzit casa scării cu planșeu din lemn, spre pod neîncălzit (secțiune verticală)
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

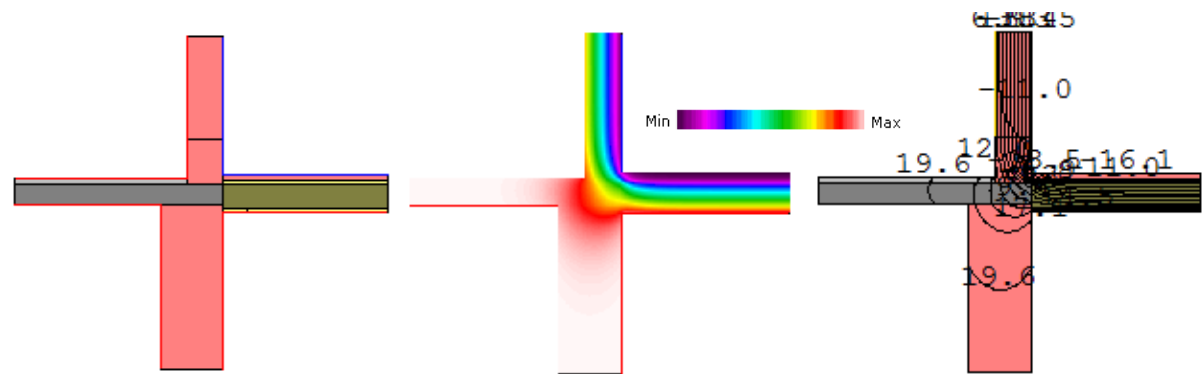


Fig. 6.49 Detaliu intersecție perete neîncălzit mansardă spre pod neîncălzit și planșeu lemn (secțiune verticală)
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

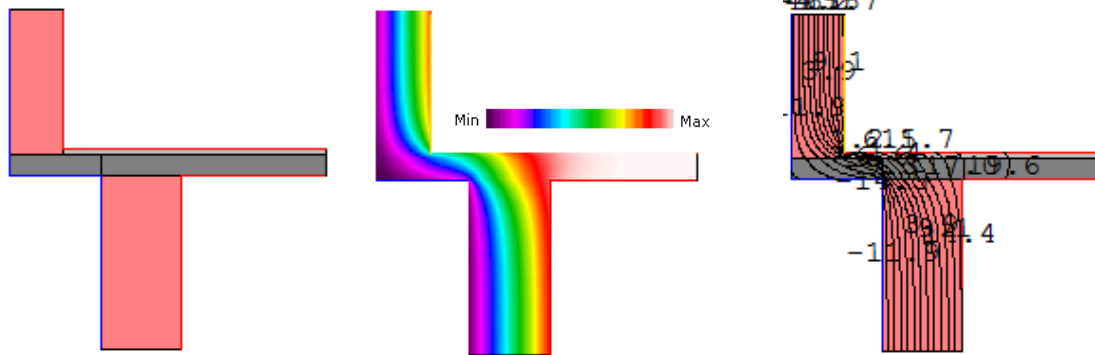


Fig. 6.50 Detaliu intersecție perete ext. cu planșeu inferior Pl.4.1 (fațadă SE, Salon 13B, Salon 7 – Etajul 1) – ieșind (secțiune verticală)
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

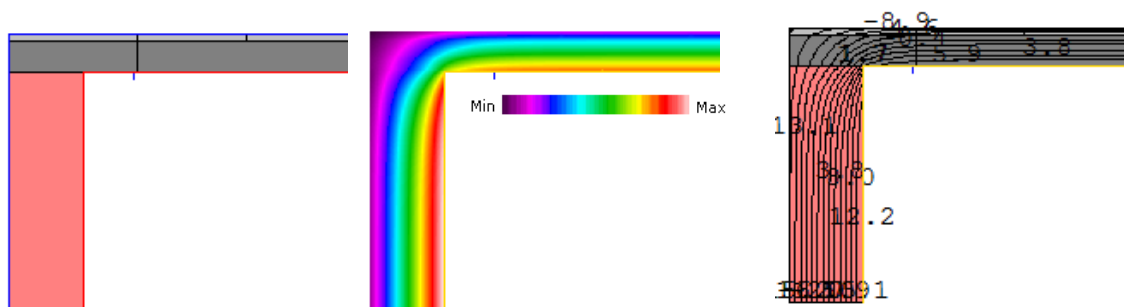


Fig. 6.51 Detaliu intersecție perete exterior P6 cu planșeu terasă Pl.3.2 – peste departament Bronhologie (ieșind)
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

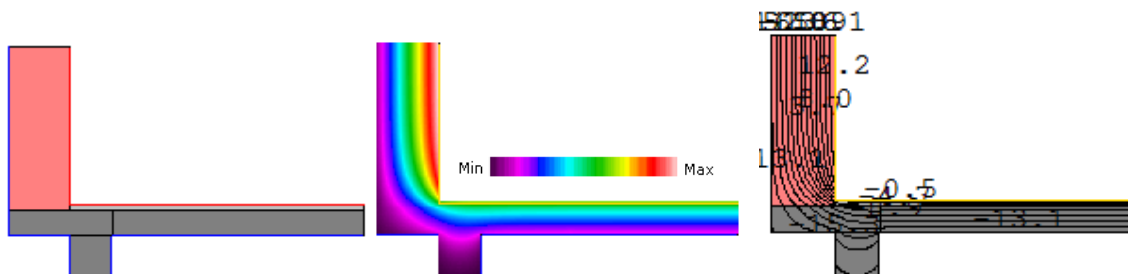


Fig. 6.52 Detaliu intersecție perete exterior cu planșeu exterior inferior peste subsol (Pl. 4.2/ Pl. 4.3)
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

6.3.2.4 Analiza performanței energetice a clădirii

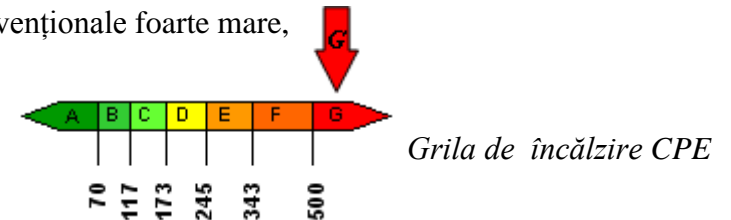
Rezultatele analizei energetice pentru situația actuală sunt centralizate în Tab. 6.26:

Tab. 6.26 Studiu de caz 2: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea reală

Secția Pneumologie - Situația existentă			
CONSUMURI Actuale clădirea existenta			
Consumuri anuale totale de energie și emisii CO2, din surse convenționale	En finala [kWh/an]	En primara [kWh/an]	Emisii CO2 [kgCO ₂ /an]
Consum anual total de energie pentru încălzire	1410704.57	1656444.94	289578.25
Consum anual total de energie pentru preparare apa calda de consum	327539.64	383221.38	67145.63
Consum anual total de energie pentru climatizare	-	-	-
Consum anual total de energie pentru ventilare mecanica	-	-	-
Consum anual total de energie iluminat artificial	22577.81	59153.86	6750.77
Total	1760822.02	2098820.19	363474.65
Consumuri anuale specifice de energie și emisii CO2, din surse convenționale	En finala [kWh/m ²]	En primara [kWh/m ²]	Emisii CO2 [kgCO ₂ /m ² *an]
Consum anual specific de energie pentru încălzire	665.32	781.21	136.57
Consum anual specific de energie pentru preparare apa calda de consum	154.47	180.73	31.67
Consum anual specific de energie pentru climatizare	-	-	-
Consum anual specific de energie pentru ventilare mecanica	-	-	-
Consum anual specific de energie iluminat artificial	10.65	27.90	3.18
Total	830.44	989.85	171.42

Rezultând un consum anual specific de energie finală pentru încălzirea spațiilor, din surse convenționale foarte mare, care încadrează clădirea în clasa energetică G:

$$q_{inc} = \frac{1410704.57}{2120.35} = 665.32 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{an}}$$



6.3.2.5 Soluții și detalii optimizate energetic, analiza tehnico-economică

S-au propus două pachete de măsuri (care conțin soluții integrate pentru anvelopă clădire, instalații, respectiv introducerea de surse regenerabile de energie), dintre care se detaliază pachetul maximal, care apoi a fost preluat și detaliat în DALI.

Soluții de eficientizare energetică propuse pentru anvelopa clădirii

Se propune:

- Izolarea termică a părții opace a fațadelor cu termosistem din vată minerală bazaltică, amplasat la exterior cu grosimea de 20 cm, cu următoarele specificații tehnice, care trebuie respectate:

Conductivitate termică de calcul, λ	Max. 0.040 W/mK
Densitate aparentă, ρ	Min. 35 kg/m ³
Efortul de compresiune a plăcilor la o deformație de 10% - CS(10/Y)	Minimum 30 kPa
Rezistența la tracțiune perpendicular pe fețe - TR	Minimum 10 kPa
Clasa de reacție la foc	A1/ A2-s1, d0

Pentru a se asigura reducerea efectului punților termice și pentru asigurarea respectării conformării energetice al detaliului constructiv introdus în modelul de calcul de transfer de flux termic, se recomandă respectarea dispunerii termoizolației conform Fig. 6.53.

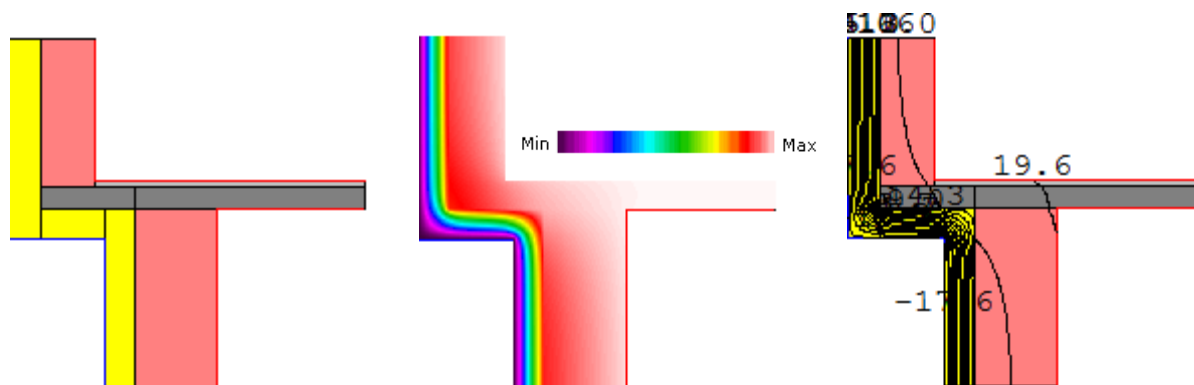


Fig. 6.53 Detaliu intersecție per. ext. cu pl. inferior Pl.4.1 (fațadă SE, Salon 13B, Salon 7 – Etajul 1) - ieșind
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

- Izolarea termică a spaleților golurilor de ferestre și uși cu termosistem din EPS ignifugat, cu o grosime de 3 cm, cu specificațiile detaliate mai jos:

Conductivitate termică de calcul, λ	Max. 0.040 W/mK
Densitate aparentă, ρ	Min. 16 kg/m ³
Efortul de compresiune a plăcilor la o deformație de 10% - CS(10)	Minimum 80 kPa
Rezistența la tracțiune perpendicular pe fețe - TR	Minimum 120 kPa
Clasa de reacție la foc	B-s2, d0

- Izolarea termică a pereților subsolului, cu termosistem din XPS, cu prelungirea acestuia până la fundație, cu o grosime de 10 cm, cu următoarele specificații tehnice:

Conductivitate termică de calcul, λ	Max. 0.040 W/mK
Densitate aparentă, ρ	Min. 28 kg/m ³
Efortul de compresiune a plăcilor la o deformație de 10% - CS(10)	Minimum 80 kPa
Rezistența la tracțiune perpendicular pe fețe - TR	Minimum 120 kPa
Clasa de reacție la foc	B-s2, d0

- ❖ Izolarea termică a pereților neîncălziți dinspre casa scării și mansarda parțială, spre podul neîncălzit cu 10 cm polistiren expandat ignifugat, cu racordarea perimetrală a termoizolației la termoizolația podului și asigurarea continuității stratului termoizolant la intersecția perete spre spațiu neîncălzit – planșeu sub pod neîncălzit (a se vedea Fig.12). Termoizolația se va proteja cu tencuială subțire cu mortar adeziv armat cu plasă din fibră de sticlă, peste care se execută o zugrăveală simplă.

Caracteristicile tehnice recomandate ale materialelor termoizolante sunt:

Conductivitate termică de calcul, λ	Max. 0.040 W/mK
Efortul de compresiune a plăcilor la o deformație de 10% - CS(10)	Minimum 80 kPa
Rezistența la tracțiune perpendicular pe fețe - TR	Minimum 120 kPa
Clasa de reacție la foc	C-s2, d0/ B-s2, d0

- Înlocuirea tâmplăriei exterioare existente, inclusiv a ușilor, cu tâmplărie termoizolantă etanșă, cu montarea tuturor ferestrelor la fața exterioară a peretelui (a zidăriei), cu respectarea următoarelor specificații:

Transmitanța termică corectată, U_w^*	Max. 1.1 W/m ² K
Clasa de reacție la foc a tâmplăriei exterioare termoizolante	Min. C-s2, d0

* U_w – coeficientul de transfer termic al ferestrei, calculat conform metodelor indicate în SR EN 10077-1/2008, valoarea conținând inclusiv efectul tâmplăriei și al distanțierilor asupra panoului de fereastră. Valoarea maximă a transmitanței termice trebuie asigurată pentru fiecare dimensiune de fereastră sau ușă care se va înlocui.

Cerințele constructive și de performanță termică pentru tâmplăria exterioară termoizolantă din profile PVC sunt următoarele:

- geam termoizolant triplu, cu două foi de sticlă acoperite cu pelicule low-e, $e \leq 0.1$, pachet de vitraj: 4-12-4-12-4 mm, umplute cu gaz inert (Argon), cu concentrație de min. 90% și distanțieri calzi “warm edges”, $U_f^{**} = \text{var } (0.8-1.2) \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.5$ (unde g – gradul de penetrare a energiei solare sau transmitanța totală a energiei solare prin sticlă);

sau:

- geam termoizolant triplu, cu două foi de sticlă acoperite cu pelicule low-e, $e \leq 0.05$, pachet de vitraj: 4-12-4-12-4 mm, umplute cu gaz inert (Argon), cu concentrație de min. 90% și distanțieri calzi “warm edges”, $U_f^{**} = \text{var } (0.8-1.4) \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.5$ (unde g – gradul de penetrare a energiei solare sau transmitanța totală a energiei solare prin sticlă);

- feronerie oscilobatantă cu închideri multipunct.

** U_f – coeficientul de transfer termic al ramei (conform terminologie SR EN 10077-1/2008 [165])

Se recomandă automatizarea sistemului de închidere a tuturor ușilor de acces în contact cu exteriorul.

❖ Izolarea termică a planșeului sub pod ultimul nivel – peste etajul 2 (P11), respectiv peste casa scării și peste mansarda parțială (P12), propune următoarea soluție tehnică:

Disponerea de polistiren expandat ignifugat cu grosimea de 30 cm peste placa din beton armat (noua soluție constructivă, structurală, propusă conform Expertizei Tehnice), cu prevederea unei șape armate din mortar de 5 cm, cu rol de protecție termosistem și ca strat de circulație pentru planșeul peste etajul 2 (P11)/ fără strat de circulație peste mansardă și casa scării (P12). Sistemul termoizolant trebuie să aibă dispus la partea inferioară (pe partea “caldă” a termoizolației) o barieră de vapori.

Specificații tehnice recomandate pentru materialele termoizolante:

Conductivitate termică de calcul, λ	Max. 0.040 W/mK
Efortul de compresiune a plăcilor la o deformare de 10% - CS(10)	Minimum 120 kPa
Rezistența la tracțiune perpendicular pe fețe - TR	Minimum 150 kPa
Clasa de reacție la foc	C-s2, d0/ B-s2, d0

Analiza termotehnică a anvelopei cu noua soluție structurală constructivă a fost realizată cu următoarele detalii tehnice și se recomandă respectarea, de principiu, a modului dispunerii termoizolației.

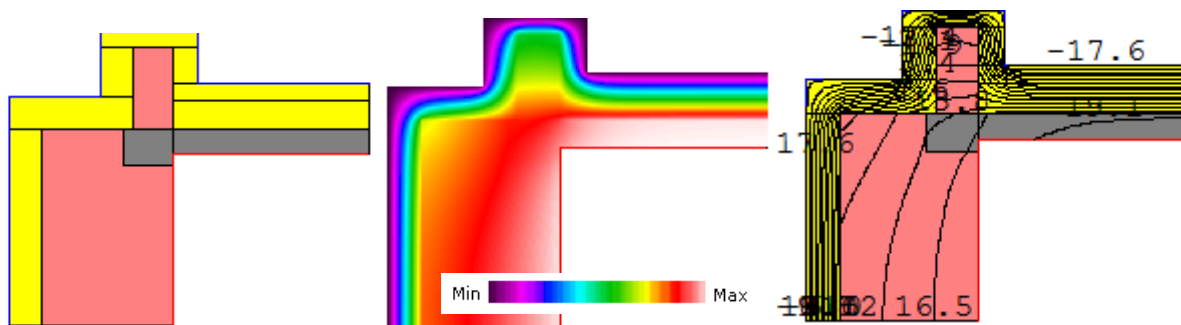


Fig. 6.54 Detalii tehnice de intersecție per. ext. P1 cu planșeu din lemn, sub pod, P11
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

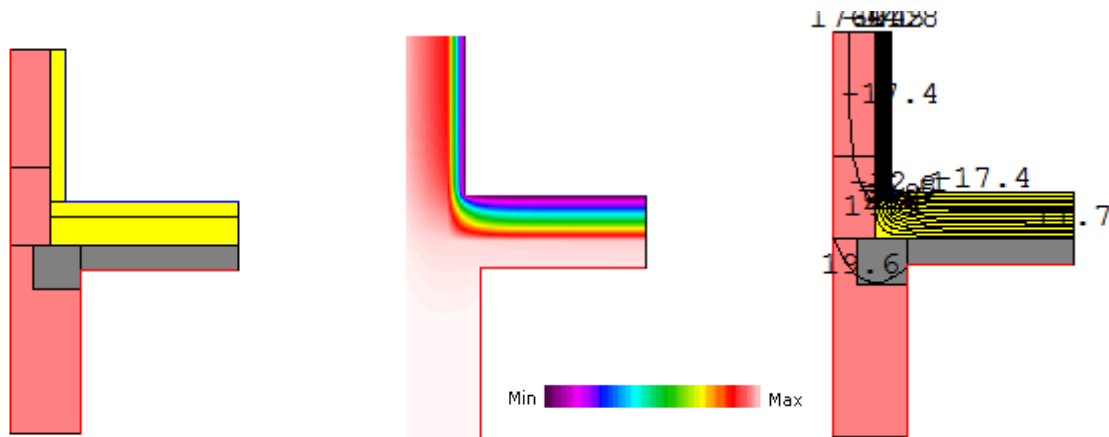


Fig. 6.55 Detalii int. per. neîncălzit casa scării cu planșeu din lemn, spre pod neîncălzit
 (a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

- Izolarea termică a planșeului peste zona acces Departament Radiologie/ Departament Brohnologie (Cameră medici) – P15, cu parcurgerea următoarelor etape:

- Curățare strat suport și control tehnic de calitate;
- Dispunerea de polistiren expandat ignifugat cu grosimea de 25 cm, cu refacerea învelitorii (dacă este cazul), în vederea asigurării că stratul de termoizolație nu va fi afectat de infiltrații de apă și cu racordarea termoizolației planșeului la termosistemul pereților;

Sistemul termoizolant trebuie să aibă dispus la partea inferioară (pe partea “caldă” a termoizolației) o barieră de vapori.

- Termoizolare planșeu terasă circulabilă peste parter (zona Departament Bronhologie) – Pl. 3.2, cu montarea la exterior a unui strat termoizolant din XPS cu o grosime de 10 cm, protejat cu un strat de mortar de ciment și refacerea stratului de circulație;

Cerințe de performanță ale materialelor termoizolante:

Conductivitate termică de calcul, λ	Max. 0.040 W/mK
Efortul de compresiune a plăcilor la o deformație de 10% - CS(10)	Minimum 200 kPa
Rezistența la tracțiune perpendicular pe fețe - TR	Minimum 200 kPa
Clasa de reacție la foc	C-s2, d0/ B-s2, d0

Pentru a se asigura reducerea efectului punților termice și pentru asigurarea respectării detaliilor constructive introduse în modelul de calcul de transfer termotehnic, se recomandă respectarea următoarelor detalii constructive:

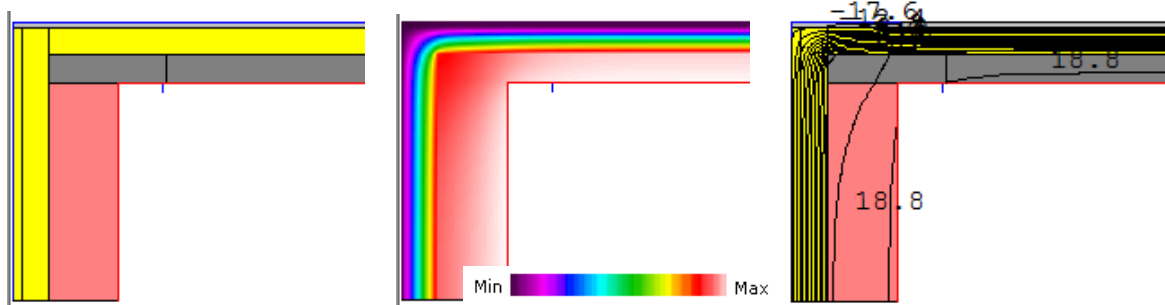


Fig. 6.56 Detaliu int. per. ext. cu planșeu terasă Pl.5 – peste dep. Bronhologie (întrând)
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

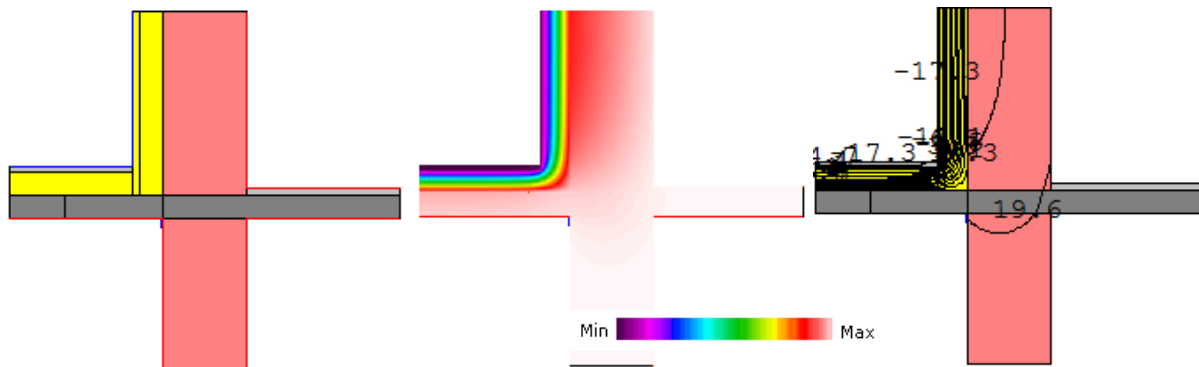


Fig. 6.57 Detaliu int. per. ext. cu planșeu terasă Pl.5 – peste dep. Bronhologie (întrând)
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

- Termoizolare planșee inferioare/exterioare, la exterior: ieșinduri pe fațada SE, sub etaj 1 (2 “buc.”) – Pl. 4.1 (Fig. 10), planșeu în zona de acces secundar la subsol (Arhivă) – Pl. 4.2, planșeu în zona de acces secundar la subsol, spre Bloc Alimentar – Pl. 4.3., cu 20 cm termosistem vată minerală, cu “îmbrăcare” grinzi din beton armat în termosistem (min. 10 cm. la partea inferioară a grinzilor), pt. plăcile Pl. 4.2 și Pl. 4.3 (Fig. 15). Cerințele de performanță propuse pentru termosistemul care se va utiliza: identice cu cele ale pereților exteriori.

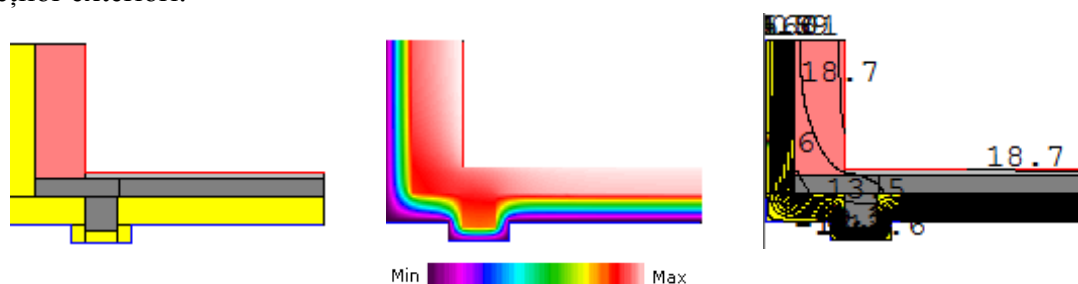


Fig. 6.58 Detaliu int. per. ext. cu planșeu ext. inferior subsol (Pl. 4.2/ Pl. 4.3)
(a) Modelul geometric (b) Suprafețe izoterme (c) Linii izoterme

- Izolarea termică a plăcii pe sol (zona îngropată din subsol) – Pl.7.1. Se propune următoarea soluție tehnică, cu parcurgerea următoarelor etape:
 - Îndepărtare stratificație actuală până la placa din beton armat;
 - Curățare strat suport;
 - Refacere hidroizolație;
 - Termoizolare cu XPS, cu grosimea de 10 cm, cu următoarele caracteristici:

Conductivitate termică de calcul, λ	Max. 0.040 W/mK
Efortul de compresiune a plăcilor la o deformație de 10% - CS(10)	Minimum 200 kPa
Rezistența la tracțiune perpendicular pe fețe – TR	Minimum 200 kPa
Clasa de reacție la foc	C-s2, d0/ B-s2, d0

- Realizarea unei șape din mortar de ciment pentru asigurare strat suport pardoseală;
- Refacere pardoseală.

Soluții propuse și parametrii de performanță energetică impuși pentru echipamentele de instalații

Sursa de încălzire – înlocuire sursă de încălzire pentru noul necesar termic obținut după aplicarea măsurilor de izolare termică a anvelopei clădirii cu pompa de căldură geotermală, care să funcționeze în sarcină maximă pentru asigurarea a 60% din necesarul de încălzire, $SCOP_{net} = \min. 3.8$ ($SCOP_{net}$ determinat conform SR EN 14825 [166]).

Se recomandă ca a doua sursă de energie termică să fie cazan în condensatie, cu combustibil gaz metan, cu randament energetic ridicat și arzător modulant.

Apă caldă menajeră - Sursa de producere a.c.c. - Înlocuirea boilerelor actuale pe gaz cu boilere care să fie alimentate de la cazanele în condensatie, respectiv cu posibilitatea alimentării acestora cu agent termic produs cu ajutorul captatoarelor solare montate pe învelitoarea de pe fațada SE. Refacerea rețelei de distribuție, cu conducte termoizolate, grosime izolație $e = 2 \cdot e_{standard}$.

Pentru limitarea consumului de apă și evitarea risipei se propune înlocuirea bateriilor actuale cu baterii cu perlator, inclusiv senzori în grupurile sanitare comune utilizate de pacienți.

Climatizare - Având în vedere destinația clădirii, se recomandă introducerea climatizării centralizate. Cerințele de performanță pentru chiller sunt: IPLV = min. 6.26.

Ventilare mecanică - Având în vedere măsurile deja propuse în vederea reducerii consumului de încălzire (termoizolare anvelopă + etanșarea clădirii), este **obligatorie** introducerea ventilației mecanice din cerințe de confort, în toate spațiile, pentru asigurarea unui schimb de aer corespunzător pentru destinația spațiului, cu recuperare de căldură cu randament al recuperatorului 82 %.

Motoarele ventilatoarelor de introducere și evacuare să fie prevăzute cu sisteme de acționare cu turație variabilă, iar puterea nominală a motoarelor să fie maxim 7.5 kW pentru ventilatoarele de introducere cu debit 16000 m³/h, respectiv 5.5 kW pentru ventilatoarele de evacuare, cu debit 14000 m³/h.

Iluminat - Se propune înlocuirea corpurilor de iluminat actuale cu corpuri de iluminat de tip LED, cu prevederea de senzori de prezență și/sau lumină naturală în toate spațiile comune (grupuri sanitare, casa scării, coridoare, etc.)

Surse regenerabile de energie (SRE)

Pompă de căldură

Sursa de încălzire – înlocuire sursă de încălzire pentru noul necesar termic obținut după aplicarea măsurilor de izolare termică a anvelopei clădirii cu pompa de căldură geotermală, care să funcționeze în sarcină maximă pentru asigurarea a 60% din necesarul de încălzire, $SCOP_{net} = \text{min. } 3.8$ ($SCOP_{net}$ determinat conform SR EN 14825 [166]).

Captatoare solare

Pentru asigurarea unui procent de 45% din necesarul/consumul de apă caldă menajeră, se propune montarea de colectoare solare cu tuburi vidate, care să asigure în lunile de vară – Iunie, Iulie, August (Iulie fiind luna de producție maximă) a unui procent max. 85% din necesarul clădirii.

Specificații tehnice:

Tip: colectoare solare cu tuburi vidate

Suprafață (aria de apertură totală): 121 m²

Orientare: Fațada SE (montaj pe învelitoare)

Factor de corectie pentru pierderea de căldura k_1 : 1,42 W/m²K

Factor de corectie pentru pierderea de căldura k_2 : 0,005 W/m²K

Randament optic minim: $\eta_0 = 0.785$

Unghi de înclinare: 45°

Panouri fotovoltaice

Pentru asigurarea consumurilor electrice la funcționarea echipamentelor: de iluminat, CTA, pompă de căldură (sezon încălzire), chiller (sezon de răcire), se propune montarea de panouri fotovoltaice cu asigurarea unui procent de 26.7% din consumurile electrice ale utilităților clădirii evaluate în auditul energetic, de pe durata unui an, cu o producție estimată de 28200 kWh/an (pentru 27 kW instalați).

Specificații tehnice:

Tip: panouri policristaline

Suprafață (apertură totală): 178 m²

Orientare: Fațada SE/ SV (montaj pe învelitoare)

Randament minim: 14%

Unghi de înclinare: 45°

În tabelele următoare s-au făcut analize atât pentru economiile de energie (Fig. 6.59, Tab. 6.28), cât și indicatori financiari (Tab. 6.27), care permit evaluarea fezabilității implementării măsurilor propuse.

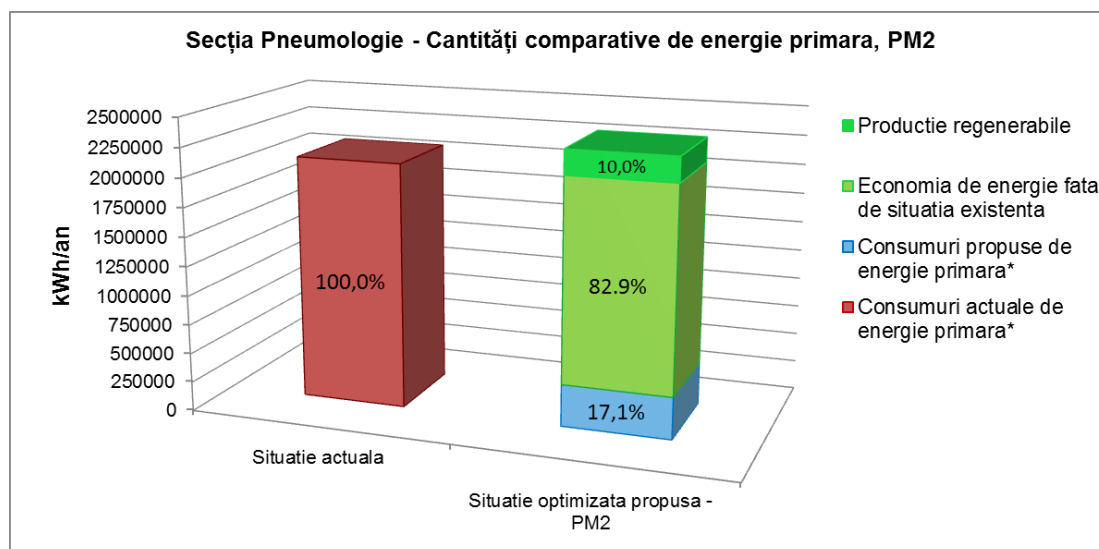


Fig. 6.59 Studiu de caz 2: Situație comparativă consumuri de energie: clădire reală vs. NZEB

Tab. 6.27 Studiu de caz 2: Indicatori economici

Soluția	N_S [Ani]	C_0 [Euro]	ΔE [kWh/an]	c [Euro/kWh]	ΔC_E [Euro/an]	ΔVNA [Euro]	e [Euro/kWh]	N_R [Ani]
PM1	20	1344866.07	1505584.9	0.06	93346.26	-1182842.51	0.04	12
PM2	20	1367023.38	1507895.12	0.06	90473.71	-1082899.7	0.05	12.5

Tab. 6.28 Studiu de caz 2: Rezultate analiză performanță energetică - clădirea NZEB

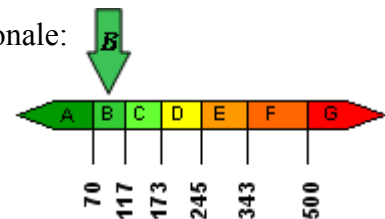
Secția Pneumologie - Soluții propuse: Pachet de Măsuri 2			
CONSUMURI Optimizate clădire Secția Pneumologie existenta tinand cont de solutiile de eficientizare prevazute in auditul energetic			
Consumuri anuale totale de energie și emisii CO2	En finala [kWh/an]	En primara [kWh/an]	Emisii CO2 [kgCO ₂ /an]
<i>incalzire termic</i>	69124.29	80875.42	14170.48
<i>incalzire electric</i>	2704.25	7085.12	808.57
<i>incalzire pompa</i>	27285.90	23465.88	7012.48
Consum anual total de energie pentru încălzire	99114.44	111426.41	21991.53
Consum anual total de energie pentru preparare apa calda de consum	106661.81	124794.32	21865.67
Consum anual total de energie pentru climatizare	8883.19	23273.96	2656.07
Consum anual total de energie pentru ventilare mecanica	36187.56	94811.41	10820.08
Consum anual total de energie iluminat artificial	2079.91	5449.36	621.89
Total	252926.91	359755.46	57955.24
Productie regenerabile (Asigurare consumuri necesare în clădire din surse regenerabile)			
Asigurare 60% din necesar incalzire cu pompa de caldura	76400.53	51188.35	
Producere apa calda de consum cu ajutorul captatoarelor solare	85336	85336	
Producere Energie electrica cu ajutorul panourilor PV	28200	73884	
TOTAL PRODUCTIE REGENERABILE	189936	210408	
Procent regenerabile raportate la consumurile finale de energie primara (Surse convenționale + RES)			36.9%
Consumuri anuale specifice de energie și emisii CO2	En finala [kWh/m ² *an]	En primara [kWh/m ² *an]	Emisii CO2 [kgCO ₂ /m ² *an]
Consum anual specific de energie pentru încălzire	46.74	52.55	10.37
Consum anual specific de energie pentru preparare apa calda de consum	50.30	58.86	10.31
Consum anual specific de energie pentru climatizare	4.19	10.98	1.25
Consum anual specific de energie pentru ventilare mecanica	17.07	44.71	5.10
Consum anual specific de energie iluminat artificial	0.98	2.57	0.29
Total	119.29	169.67	27.33

Rezultând un consum anual specific de energie finală pentru încălzirea spațiilor, din surse convenționale:

$$q_{inc.conventional} = 46.74 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$$

La care se adaugă o componentă de producție/ consum, din surse regenerabile de energie:

$$q_{inc.RES} = 36.03 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$$



Grila de încălzire

Se observă, așadar, că cel mai mare consum inițial (consumul de energie pentru încălzire) a fost redus semnificativ.

6.4 Contribuții și concluzii

Prin studiile de caz elaborate s-a dorit identificarea unor caracteristici specifice în implementarea conceptului NZEB în clădiri nerezidențiale existente. Proiectarea integrată în termeni de eficiența energetică și transformarea acestora în NZEB (Nearly Zero Energy Buildings), presupune elaborarea de modele detaliate de calcul ale clădirii și vizează identificarea soluțiilor tehnice necesare pentru anvelopa clădirii, instalații și surse regenerabile de energie.

În cadrul proiectului neZEH (subcap. 6.2), așa cum s-a precizat deja, rolul autoarei a fost de identificare a măsurilor care vizează reducerea necesarului de încălzire al clădirii, printr-o analiză detaliată a situației inițiale, respectiv prin analiza energetică a clădirii în ipoteza implementării soluțiilor propuse.

Modelul de calcul utilizat în aceste studii de caz și care a dus la rezultate realiste, verificabile prin compararea cu istoricul de consumuri real conține:

- *Calcul numeric al punților termice*, prin simulări numerice bidimensionale, în regim staționar, utilizând metoda elementului finit, ale detaliilor constructive specifice a căror valori ale coeficienților liniari de transfer termic nu se găsesc în cataloage de punți termice;
- *Calcul multizonal al necesarului de încălzire*, în funcție de funcțiunile principale ale clădirii și de modul lor de utilizare, cu analiza detaliată a anvelopei clădirii pentru fiecare zonă de calcul luată în considerare, utilizând metoda lunară;
- *Calcul cu intermitență*, care se transpune prin corecția necesarului de încălzire, prin calculul unor caracteristici dinamice, respectiv prin calculul valorilor NgZ^* ;
- *Utilizarea măsurătorilor termografice* în analiza termică și energetică, prin interpretarea hărților termografice.

În acest sens este de menționat că în analiza acestor clădiri, *rezultatele din modelul de calcul au avut diferența de sub 1% față de consumurile înregistrate în facturi pe ultimii 3 ani*, la ambele clădiri analizate.

În cadrul proiectului din studiul de caz din subcap. 6.2.3, s-a fundamentat o strategie privind creșterea eficienței energetice a clădirii și transformarea acesteia în NZEB, totodată analizând integrat impactul unor soluții atât pentru anvelopa clădirii, cât și pentru instalații și surse regenerabile de energie.

Strategia în baza căreia s-a elaborat studiul de caz, promovată și în [144], cu aplicabilitate și în cazul clădirilor rezidențiale, constă în aplicarea a 3 tipuri de măsuri în auditul energetic al clădirii:

- Primul tip de măsuri are ca scop *reducerea necesarului de încălzire al clădirii* într-un procent cât ridicat, prin măsuri de termoizolare și creșterea etanșeității anvelopei clădirii, având în vedere limitele pe care le au clădirile existente: amplasare în zone protejate istoric, spațiu limitat, umbriri de la clădirile din jur, etc.

- Al doilea tip de măsuri propus în strategia privind creșterea eficienței energetice a clădirii este reprezentat de *utilizarea unor echipamente performante pentru încălzire, apă caldă menajeră, climatizare, ventilare mecanică și iluminat*, care au parametrii de performanță energetică în exploatare mult mai ridicați, cu scopul de a reduce consumul de energie primară aferent acestor utilități, cu impunerea parametrilor care vizează consumurile de energie în exploatare ale echipamentelor (randamente la cazane, eficiența energetică sezonieră - ESEER sau IPLV - la chillere, SCOP la pompe de căldură, etc.).
Pentru specialitățile în care se intervine, o renovare complexă implică ridicarea la standardele actuale de proiectare, iar măsurile contribuie, de asemenea, și la creșterea confortului ocupanților clădirii, respectiv la asigurarea unui microclimat corespunzător destinației clădirii.
- Cerințele de energie deja semnificativ scăzute, trebuie să fie acoperite într-un procent cât mai ridicat, dar minim 10%, cu *surse regenerabile de energie*, care reprezintă al treilea tip de măsuri aplicabile acestui concept, cu impunerea unor specificații tehnice pentru echipamentele SRE.

În ceea ce privește *aplicabilitatea generalizată* al acestui studiu de caz (clădirea de tip spital), se subliniază și modul în care auditul energetic al unui asemenea proiect trebuie elaborat, fiind necesar ca auditorul energetic, pe lângă propunerea detaliată (la nivel de detalii constructive, unde detaliile sunt atipice) a soluțiilor specifice anvelopei clădirii, să impună specificațiile tehnice referitoare la performanța energetică pentru **toate** echipamentele, care ulterior se proiectează pentru a deservi viitoarea clădire cu consum de energie aproape egal cu zero, respectiv pentru echipamentele care reprezintă surse regenerabile de energie.

O asemenea abordare, având puternic caracter interdisciplinar, implică un volum mare de cunoștințe, însă, deocamdată auditorul energetic este singurul specialist din România care are competențele legale să elaboreze aceste analize și care poartă răspunderea legală a lor. Totodată, o asemenea abordare identifică și necesitatea apariției unui nou tip de specialist în inginerie, care să aibă competențele să intervină punctual pe parcursul procesului de proiectare, cu o perspectivă energetică integrată, în cadrul specialităților arhitectură și instalații: încălzire, apă caldă, climatizare, ventilare mecanică, iluminat, respectiv surse regenerabile de energie, *inclusiv pentru clădirile noi*.

Principalele concluzii care se desprind din studiile de caz efectuate și care au potențială aplicabilitate la scară largă, prin generalizarea lor, în ipoteza introducerii lor într-o metodologie de evaluare a performanței energetice a clădirilor nerezidențiale, și care reprezintă *contribuții aplicative* în cadrul tezei prin acest capitol, sunt:

- ❖ Importanța gradului de ocupare al clădirilor, care influențează în mod semnificativ rezultatele analizei energetice. Dacă se consideră în calculul clădirii reale ipoteza utilizării clădirii la capacitatea din proiect, pot interveni erori ale rezultatelor, de tipul:
 - consumuri specifice mai mari și nerealiste, certificatul de performanță energetică nemaifiind un instrument util de informare a proprietarului clădirii vis-à-vis de profilul energetic real al clădirii;

- erori în analiza energetică și tehnico-financiară, în sensul stabilirii unor economii potențiale de energie și a unor costuri ale investițiilor, care nu vor fi reale în momentul aplicării investiției, cu potențiale efecte negative, mai ales dacă investițiile sunt din bani publici sau din fonduri europene.

În baza acestei observații se recomandă ca în certificatul de performanță energetică al clădirilor nerezidențiale să se specifice gradul de ocupare mediu din ultimul an acolo unde se pretează, corelat cu destinația clădirii (grad de ocupare al spațiilor de cazare – în cazul hotelurilor, grad de ocupare al paturilor - în cazul unităților medicale de tip spital, etc.).

- Potențialul de economie de energie poate varia semnificativ de la o clădire la alta, chiar dacă destinația clădirii este aceeași și principalele funcțiuni sunt similare.
- Reducerea necesarului de încălzire prin măsuri aplicate clădirilor, ca o primă etapă în procesul de *renovare majoră* a clădirii și transformare în NZEB, are un impact semnificativ în datele de intrare necesare proiectării instalațiilor, astfel că se impun modele riguroase de calcul termotehnic al construcțiilor, care să fie preluate în etapa de dimensionare a instalațiilor.
- Un rol esențial în transformarea în clădire cu consum de energie aproape egal cu zero îl au instalațiile, astfel că, printr-o proiectare integrată (construcții și instalații) s-a ajuns la economii importante de energie din surse convenționale, economii mărite și mai mult prin producerea de energie din surse regenerabile de energie.
- Durata de amortizare a investiției este semnificativ mai redusă față de cea rezultată din analizele energetice curente, așadar cu un impact pozitiv asupra conceptului, dar și cu obligativitatea utilizării unor modele de calcul mult mai detaliate.
- Se subliniază importanța introducerii metodelor numerice în procesul curent de proiectare termotehnică al detaliilor constructive optimizate energetic.
- Se subliniază importanța specificării caracteristicilor de performanță energetică a echipamentelor și transmiterea către echipa de proiectare de către specialistul care efectuează aceste analize pentru a exista un real control asupra viitoarelor consumuri de energie. În acest sens, detalierea și descrierea specificațiilor tehnice pentru anvelopa clădirii, instalații și surse regenerabile de energie efectuate în subcap. 6.3.2.5 reprezintă o *propunere de conținut-cadru minimal în Auditul Energetic, privind nivelul de detaliere al soluțiilor integrate de eficientizare energetică a clădirii*, atât în ceea ce privește conformarea anvelopei clădirii, cât și al parametrilor de performanță energetică impuși pentru principalele echipamente de instalații și SRE, cu scopul obligării proiectanților să le preia din Auditul Energetic, ca ulterior să le dezvolte în proiectul tehnic, pe specialități. O asemenea abordare are scopul de a asigura o *colaborare interdisciplinară riguroasă între auditorul energetic* - specialistul care are competențele de identificare a soluțiilor de eficientizare energetică, respectiv de evaluare a modului în care energia se consumă în clădiri, și *proiectanții pe specialități* – care au competențele de proiectare a soluțiilor tehnice și echipamentelor identificate și propuse de către auditorul energetic, cu scopul final și nobil de reducere al consumului de energie în clădiri, într-o manieră controlată.

Capitol 7 Concluzii, contribuții, diseminare rezultate și direcții viitoare de cercetare

7.1 Concluzii

O scurtă sumarizare a lucrării, precum și principalele concluzii care se desprind sunt prezentate în cele ce urmează.

Capitolul 2. Conform analizelor efectuate în ultimii ani la nivel mondial, una dintre direcțiile majore de urmat este reducerea consumului de energie, iar unul dintre consumatorii principali fiind clădirile, este necesar ca eforturile să fie direcționate în vederea reducerii necesarului de energie printr-o conformare termică corespunzătoare a acestora.

Din perspectiva economiei de energie, domeniul clădirilor din sectorul terțiar este insuficient tratat în literatura de specialitate din România. Diversitatea mare a detaliilor constructive existente la ora actuală în ceea ce privește închiderile clădirilor din sectorul terțiar, în speță halele industriale, precum și metodologiile de calcul specifice sumare sau inexistente la nivel național, duc la necesitatea investigării comprehensive din punct de vedere energetic al acestor tipuri de clădiri.

Capitolul 3. Prin studiile efectuate în acest capitol s-a dorit obținerea unor informații cu privire la performanța termică a detaliilor constructive utilizate în mod curent pe piață la închiderile cu panouri compozite termoizolate cu înveliș metalic, caracteristice în special halelor industriale, dar și altor tipuri de clădiri nerezidențiale, utilizând metode numerice (Metoda Elementului Finit) de determinare a transferului de flux termic, în regim termic staționar, calcul bidimensional, utilizând programul THERM.

Diversitatea mare a detaliilor constructive existente la ora actuală fac imposibilă o analiză completă a acestui tip de soluție tehnică, dar rezultatele simulărilor numerice a unor detalii constructive utilizate în mod curent oferă o imagine extensivă a influenței punților termice liniare geometrice și/sau de material asupra lor.

Subcap. 3.1 și subcap. 3.2 prezintă câteva considerente teoretice cu privire la metodele numerice și analitice aplicate, respectiv detaliază condițiile de analiză numerică în baza cărora s-au efectuat aceste studii. Rezultatele studiilor întreprinse sunt detaliate în *subcap. 3.3, subcap. 3.4 și subcap. 3.5* și reprezintă *contribuții aplicative*.

La ora actuală, nefiind disponibile nici un fel de studii de acest tip cu privire la această tematică, actualele studii întreprinse vin să completeze cunoștințele actuale, reprezentând în mod practic *un instrument curent de lucru pentru auditorii energetici* care pot utiliza valorile coeficienților liniari de transfer termic în analizele necesare elaborării certificatelor de performanță energetică, iar pe baza soluțiilor constructive optimizate propuse în *subcap. 3.4*, chiar și în audituri energetice elaborate pentru clădirile care utilizează acest tip de soluție constructivă. Totodată, rezultatele obținute pot fi utilizate de către specialiștii în inginerie civilă

și arhitecți la *elaborarea unor studii termotehnice* privind performanța termică a clădirilor proiectate.

Cunoașterea unor probleme specifice acestor tipuri de clădiri, poate conduce la corectarea unor erori de proiectare și execuție actuale, cu intenția finală de diminuare a consumului de energie în exploatare. În acest sens, în *subcap. 3.3* s-a identificat că cele mai mari valori ale coeficienților liniari de transfer termic s-au obținut la detaliul de îmbinare panou de perete cu placa pe sol, astfel că în *subcap. 3.4* s-au propus mai multe variante de optimizare a detaliilor, în vederea reducerii semnificative a efectului punților termice existente.

În *subcap. 3.5* s-au efectuat studii parametrice care au avut ca scop integrarea rezultatelor obținute la nivel de detaliu, în studii la nivel de element de anvelopă clădire, pentru pereții exteriori și planșeul de tip terasă necirculabilă. Rezultatele studiilor evidențiază că impactul punților termice asupra performanței termice a elementelor de anvelopă, în special pentru pereți, este semnificativ, similar soluției constructive clasice de pereți din zidărie de cărămidă cu termoizolație dispusă la exterior.

Capitolul 4, vine în continuarea *capitolului 3*, a studiului elementelor de anvelopă ale clădirilor nerezidențiale de tip hală, evidențiindu-se faptul că placa pe sol este un element important al anvelopei acestui tip de clădiri, prin prisma suprafeței ocupate raportat la suprafața totală a anvelopei clădirii.

Referitor la dimensiunile acestui element de anvelopă, de regulă dimensiuni mari, se ridică întrebări specifice, de tipul:

- Modelele analitice de calcul existente în reglementările tehnice naționale, care surprind efectele transferului de căldură bidimensional sau tridimensional pe baza unor analize numerice în regim staționar sunt corespunzătoare studiului transferului de căldură spre sol pe durate îndelungate de timp al elementelor de clădire care au această particularitate dimensională?
- Care este efectul proprietăților de inerție termică ale solului asupra procesului de transfer de căldură în cazul plăcilor pe sol de dimensiuni mari pentru perioade îndelungate de timp?

Pentru a se obține răspunsuri la acest tip de întrebări, *capitolul 4* cuprinde studii comprehensive privind calculul unei zone puțin studiate în termotehnica construcțiilor: transferul de flux termic la plăci pe sol de dimensiuni mari pe durate lungi de timp, cu metode numerice (Metoda Elementului Finit), în regim termic staționar și nestaționar, pe modele geometrice tridimensionale, cu ajutorul programului COMSOL, prin utilizarea teoriei similitudinii, cu propunerea unui model simil care se pretează la analizele numerice în regim nestaționar. Rezultatele obținute prin modelări numerice s-au comparat cu rezultate obținute prin modele analitice.

Capitolul 5. Principalele contribuții prin acest capitol al tezei constau în introducerea *Inteligenței Artificiale* într-un domeniu din ingineria civilă (termotehnica construcțiilor) în care nu există abordări de acest tip.

S-a propus o soluție inovativă de utilizare a unor tehnici de Inteligență Artificială aplicată, într-un domeniu specific exclusiv cercetării la ora actuală în România, și anume metode numerice aplicate în transferul de căldură tridimensional în regim nestaționar de lungă

durată, în studiul interacțiunii clădire - sol, propunând astfel o schimbare de paradigmă în acest domeniu, soluție concretizată prin fundamentarea și elaborarea a două aplicații:

Aplicația 1

- Permite optimizarea (reducerea) resurselor, timp și memorie computațională, necesare studiului comprehensiv de lungă durată a transferului de flux termic în interacțiunea clădire - sol, prin predicționarea valorilor de flux termic pe o placă pe sol, cu pas orar, pe perioade mari de timp, în anumite condiții;
- Continuarea analizei numerice cu această aplicație în Inteligență Artificială permite **substituirea parțială a ecuațiilor termo-dinamice** care caracterizează procesul și reprezintă o **metodă hibridă, de tip “grey box”**.

Aplicația 2

- Permite determinarea pierderilor de căldură orare ale unei plăci pe sol pentru orice dimensiune, adică răspunsul termic al părții de clădire studiată în interacțiunea cu mediul înconjurător și cu solul, în urma învățării răspunsurilor de la alte dimensiuni de plăci pe sol (30x30 m, 50x50 m, 70x70 m, 100x100 m);
- Această aplicație în Inteligență Artificială permite **substituirea totală a ecuațiilor termo-dinamice** pentru o dimensiune distinctă a plăcii pe sol, prin predicționarea fluxurilor termice orare pe durate lungi de timp (mai multe sezoane de încălzire), pe baza unor parametrizări de dimensiuni în modele elaborate cu metode numerice, și reprezintă o **metodă de tip “black-box”**.

O asemenea abordare se adresează în primul rând cercetătorilor, cu posibilitatea utilizării aplicațiilor ca bază de lucru pentru elaborare a unor studii comprehensive, pentru că prin studii comprehensive se poate ajunge la metode analitice simplificate, care să reprezinte un instrument de calcul facil pentru ingineri, în special pentru specialiștii auditori energetici, dar în egală măsură se adresează și inginerilor, având în vedere contextul actual și eforturile internaționale tot mai accelerate făcute cu scopul reducerii dramatice a consumurilor de energie, noi concepte de proiectare energetică fiind deja introduse, cum este conceptul NZEB (Nearly Zero Energy Buildings) sau clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero, unde nivelul de detaliere și acuratețe al modelelor analizate de către ingineri va trebui să crească semnificativ pentru a se atinge indicatorii țintă specifici conceptului, indicatori care ulterior vor fi monitorizați în clădirile reale.

Capitolul 6. Prin studiile de caz elaborate, s-a dorit identificarea unor caracteristici specifice în implementarea conceptului NZEB (Nearly Zero Energy Buildings) în clădiri nerezidențiale existente. Proiectarea integrată în termeni de eficiența energetică și transformarea acestora în NZEB, presupune elaborarea de modele detaliate de calcul ale clădirii și vizează soluțiile tehnice pentru anvelopa clădirii, instalații și surse regenerabile de energie.

În cadrul proiectului neZEH – Studii de caz 1.A și 1.B (*subcap. 6.2*), așa cum s-a precizat, rolul autoarei a fost de identificare a măsurilor care vizează reducerea necesarului de încălzire al clădirii, printr-o analiză detaliată a situației inițiale, respectiv prin analiza energetică a clădirii în ipoteza implementării soluțiilor propuse.

Modelul de calcul utilizat în aceste studii de caz și care a dus la rezultate realiste, verificabile prin compararea cu istoricul de consumuri real conține:

- *Calcul numeric al punților termice*, prin simulări numerice utilizând Metoda Elementului Finit pe geometrii bidimensionale, în regim termic staționar, pentru detaliile constructive specifice ale căror valori ale coeficienților liniari de transfer termic nu s-au găsit în cataloage de punți termice;
- *Calcul multizonal al necesarului de încălzire*, în funcție de funcțiunile principale ale clădirii și de modul lor de utilizare, cu analiza detaliată a anvelopei clădirii pentru fiecare zonă de calcul luată în considerare, cu bilanțuri termice utilizând metoda lunară;
- *Calcul cu intermitență*, care se transpune prin corecția necesarului de încălzire, prin calculul unor caracteristici dinamice, respectiv prin calculul valorilor NGz^* ;
- *Utilizarea măsurătorilor termografice* în analiza termică și energetică, ca metodă complementară calitativă, cu interpretarea hărților termografice;

În acest sens, este de menționat că în analiza acestor clădiri, *rezultatele din modelul de calcul au avut diferența de sub 1% față de consumurile înregistrate în facturi analizate pe ultimii 3 ani*, la ambele clădiri analizate.

În cadrul proiectului din Studiul de caz 2 din *subcap. 6.3.2*, s-a fundamentat o strategie privind creșterea eficienței energetice a clădirii de tip spital și transformarea acesteia în NZEB, totodată analizând integrat impactul unor soluții atât pentru anvelopa clădirii, cât și pentru instalații și surse regenerabile de energie.

Strategia în baza căreia s-a elaborat studiul de caz, promovată de către autoare și în [144], cu aplicabilitate și în cazul clădirilor rezidențiale, este:

- Primul tip de măsuri are ca scop *reducerea necesarului de încălzire al clădirii* într-un procent cât mai ridicat, prin măsuri de termoizolare și creșterea etanșeității anvelopei clădirii, având în vedere limitele pe care le au clădirile existente: amplasare în zone protejate istoric, spațiu limitat, umbrirea de la clădirile din jur, etc..
- Al doilea tip de măsuri propus în strategia privind creșterea eficienței energetice a clădirii este reprezentat de *utilizarea unor echipamente performante pentru încălzire, apă caldă menajeră, climatizare, ventilare mecanică și iluminat*, care au parametrii de performanță energetică în exploatare mult mai ridicați, cu scopul de a reduce consumul de energie primară aferent acestor utilități. Pentru specialitățile în care se intervine, o renovare majoră implică ridicarea la standardele actuale de proiectare, iar măsurile contribuie,

de asemenea, și la creșterea confortului ocupanților clădirii, respectiv la asigurarea unui microclimat corespunzător destinației clădirii.

- Cerințele de energie deja semnificativ scăzute, trebuie să fie acoperite într-un procent cât mai ridicat, dar minim 10%, cu *surse regenerabile de energie*, care reprezintă al treilea tip de măsuri aplicabile acestui concept.

În ceea ce privește *aplicabilitatea generalizată* al acestui studiu de caz (clădirea de tip spital), se subliniază și modul în care auditul energetic al unui asemenea proiect trebuie elaborat, fiind necesar ca auditorul energetic, pe lângă propunerea detaliată (la nivel de detalii constructive, unde detaliile sunt atipice) a soluțiilor specifice anvelopei clădirii, să impună *specificațiile tehnice referitoare la performanța energetică pentru toate echipamentele*, care ulterior se proiectează pentru a deservei viitoarea clădire cu consum de energie aproape egal cu zero, respectiv pentru echipamentele care reprezintă surse regenerabile de energie.

O asemenea abordare, având puternic caracter interdisciplinar, implică un volum mare de cunoștințe, însă, deocamdată auditorul energetic este singurul specialist din România care are competențele legale să elaboreze aceste analize și care poartă răspunderea legală a lor. Totodată, o asemenea abordare identifică și *necesitatea apariției unui nou tip de specialist în inginerie*, care să aibă competențele să intervină punctual pe parcursul procesului de proiectare, cu o perspectivă energetică integrată, în cadrul specialităților arhitectură și instalații: încălzire, apă caldă, climatizare, ventilare mecanică, iluminat, SRE, inclusiv pentru clădirile noi.

7.2 Contribuții

Lucrarea și-a propus să aducă contribuții în domeniul performanței energetice a clădirilor nerezidențiale. Prin efectuarea de analize extensive, la nivel de detalii constructive, părți de clădire sau integrat la nivel de clădire, s-au adus atât contribuții teoretice, cât și contribuții aplicative. În cele ce urmează, contribuțiile sunt prezentate succint, la nivelul fiecărui capitol.

Capitolul 2

- ❖ Contribuția adusă prin acest capitol constă în sistematizarea bibliografiei aferente cadrului legislativ și al cadrului normativ aplicabil, cu colectarea unor date care să permită utilizarea metodelor avansate de calcul aplicate subiectelor de studiu din *cap. 3*, *cap. 4* și *cap. 5*, subiecte care au fost identificate, fie neavând nici un fel de rezultate obținute prin cercetare științifică (performanța termică a panourilor compozite termoizolate cu înveliș metalic), fie cu un număr de investigații limitat al subiectului (transferul de flux termic la plăci pe sol de dimensiuni mari), deși sunt întâlnite în mod curent în clădiri reale, sau subiecte noi, cum este conceptul de proiectare NZEB (*cap. 6*) a cărui implementare la scară largă este iminentă, fără ca un cadru metodologic integrat sau cazuri de bune practică să existe la ora actuală.

Capitolul 3

Sintetic, principalele *contribuții aplicative* constau în:

- ❖ Colectarea de detalii constructive cu largă răspândire pe piața din România, corespunzătoare elementelor constructive de tip perete și planșeu terasă necirculabilă pentru soluția tehnică de tip panou compozit termoizolat cu înveliș metalic;
- ❖ Construirea modelelor numerice bidimensionale (geometrii, condiții de material, condiții de contur) corespunzătoare studiului comprehensiv al performanței termice prin analiză numerică a transferului de căldură în regim staționar;
- ❖ Parametrizarea dimensiunilor (grosimilor) panourilor analizate la nivel de detalii constructive, astfel încât rezultatele obținute acoperă principalele grosimi existente pe piață pentru această soluție constructivă;
- ❖ Determinarea coeficienților liniari de transfer termic cu relații analitice utilizând rezultatele obținute prin simulare numerică și centralizarea lor, pentru fiecare tip de detaliu constructiv analizat;
- ❖ Identificarea detaliilor constructive cu o performanță termică scăzută și optimizarea lor, cu efectuarea de analize numerice și calculul coeficienților liniari de transfer termic și pentru detaliile optimizate;
- ❖ Elaborarea unui studiu parametric al impactului punților termice identificate și al căror efect este cuantificat în indicatori sintetici (coeficienți liniari de transfer termic), în analize la nivel de elemente ale anvelopei clădirii (fațada, planșeu de acoperiș);
- ❖ Conținutul întregului *Capitol 3* poate fi considerat un **catalog de punți termice pentru panouri compozite termoizolate cu înveliș metalic**, ca soluție constructivă de închidere caracteristică clădirilor din sectorul nerezidențial.

În analiza efectuată pentru determinarea coeficienților liniari de transfer termic a detaliilor de îmbinare a panoului de perete cu placa pe sol, respectiv în analiza soluțiilor propuse pentru optimizare s-au remarcat o serie de efecte, astfel că se fac următoarele observații cu caracter general, observații care constituie *contribuții teoretice*:

- ❖ La intersecția unui element termoizolat (panou de perete) cu un element netermoizolat (soclu netermoizolat) se remarcă creșterea efectului de punte termică în elementul termoizolat odată cu creșterea grosimii termoizolației în panou;
- ❖ Se remarcă influența importantă a lungimii suprapunerii a panoului de perete cu elementul perimetral din beton armat, astfel cu cât lungimea de suprapunere crește, cu atât efectul defavorabil al punții termice geometrice și de material scade în ambele elemente de construcție.

Se face precizarea că astfel de observații cu caracter general, rezultate din interpretarea rezultatelor obținute s-au efectuat, de altfel, pentru fiecare tip de detaliu constructiv analizat și se regăsesc în cuprinsul *subcap. 3.3*.

Capitolul 4

Contribuțiile teoretice proprii din acest capitol constau în:

- ❖ Fundamentarea unui model teoretic utilizând teoria similitudinii, care permite scalarea modelelor numerice de dimensiuni mari, aplicabil studiilor numerice în regim staționar și nestaționar, cu formularea relației matematice care permite extrapolarea rezultatelor fluxului termic la scara inițială permițând astfel o interpretare facilă și totodată riguroasă a rezultatelor. Modelul simil dezvoltat permite analize pe modele geometrice mult reduse, ceea ce oferă acces la efectuarea de studii comprehensive îndelungate pe modele tridimensionale a transferului de căldură la clădiri de dimensiuni mari și interacțiunea lor cu solul, modele care până acum nu erau foarte accesibile, datorită consumului prohibitiv de resurse computaționale;
- ❖ Se remarcă potențialul de generalizare al aplicabilității modelului simil propus, în sensul posibilității utilizării acestuia și pentru alte studii ale transferului de flux termic ale clădirii la interacțiunea cu terenul și cu mediul exterior (subsoluri încălzite, subsoluri neîncălzite, sub toată clădirea sau parțială), etc.;
- ❖ Revenind la ipoteza lui Leonăchescu redată în subcap. 4.1.1, că doar în cazul existenței apei subterane o parte fluxul termic se disipă spre stratul de apă subterană [80], stadiul actual al cunoașterii se completează cu rezultatele studiilor comprehensive întreprinse în această teză, iar concluziile sunt că și în absența apei subterane o parte din fluxul termic se disipă spre sol, datorită proprietăților de inerție termică ale pământului, așa cum rezultă din rezolvarea ecuației căldurii în regim nestaționar pe durate îndelungate de timp, cel puțin pentru clădirile de dimensiuni mari, care au făcut obiectul acestor studii;
- ❖ Totodată, se poate enunța că nu condiția de existență a apei subterane este cauza căreia o parte din fluxul termic se disipă spre sol, ci proprietățile de masă termică ale pământului, așa cum rezultă din rezolvarea ecuației căldurii în regim nestaționar pe durate îndelungate de timp, cel puțin pentru clădirile de dimensiuni mari;
- ❖ Mai mult, prin studiile efectuate în acest capitol s-a demonstrat, ca și efect specific plăcilor pe sol de dimensiuni mari, că în cazul încălzirii clădirii, o parte din căldura care se disipă către sol, se menține în solul de sub placă de la un an la altul, de la un sezon de încălzire la următorul sezon de încălzire, demonstrându-se astfel un **fenomen de stocaj al căldurii în sol caracteristic clădirilor de dimensiuni mari**, care duce la reducerea pierderilor de căldură ale elementului de anvelopă placa pe sol, implicit la reducerea consumului de căldură al clădirii la nivel de sezon de încălzire.

Referitor la acest rezultat, trebuie făcute precizările:

- Cantitatea de căldură acumulată sub sol, rămasă în sol după 9 luni de la întreruperea încălzirii în partea de clădire analizată este destul de redusă;
- Calculul s-a condus pentru o placă de dimensiunea echivalentă 900 m^2 . Rămâne de cercetat ulterior ce se întâmplă cu acest efect în cazul creșterii dimensiunii plăcii pe sol.

Se remarcă potențialul de aplicabilitate al acestui efect în optimizarea energetică a anvelopei acestor clădiri.

Contribuțiile aplicative din acest capitol sunt:

- ❖ Aplicarea condițiilor de contur de tip Dirichlet și Neumann în rezolvarea ecuației diferențiale parțiale de tip Laplace (ecuația căldurii în regim staționar fără surse de căldură), cu Metoda Elementului Finit pe un exemplu manual de calcul - cazul unidirecțional – în *subcap. 4.1.2*;
- ❖ Identificarea și testarea parametrilor: rețea de discretizare, subpasul de simulare, tipul de algoritm utilizat (direct sau iterativ), care influențează rezultatele simulărilor numerice în regim termic nestaționar – în *subcap. 4.3.1*;
- ❖ Verificarea influenței metodei de inițializare în studiile numerice în regim nestaționar - în *subcap. 4.3.4*;
- ❖ Elaborarea unui model de referință scara 1:1, prin utilizarea unor tehnici de modelare numerică, pentru colțul bisimetric al unei plăci pe sol de dimensiuni 30x30 m, pe care s-a efectuat simularea numerică a transferului de căldură orar pe perioada investigată de opt ani/ șapte sezoane de încălzire, care a permis validarea rezultatelor obținute cu ajutorul modelului similar, prin analize comparative între: fluxul termic integrat pe suprafața plăcii, câmpul de temperaturi în diferite secțiuni ale modelului pentru pași de timp aleși în mod arbitrar, respectiv efectul inerției termice, pentru modelul real versus modelul similar.
- ❖ Studiile numerice parametrice efectuate prin modelul similar propus pentru dimensiuni mari de plăci (50x50 m, 60x60 m, 70x70 m și 100x100 m) și interacțiunea acestora cu solul permit înțelegerea modului în care clădirea interacționează cu solul din punct de vedere termotehnic pe termen lung;
- ❖ Față de actualele modele propuse în standardele și normativele tehnice aplicabile la nivel național s-au identificat diferențe.

Capitolul 5

În ceea ce privește *contribuțiile* personale aduse prin prima aplicație propusă, acestea sunt:

- ❖ Propunerea *unei metode alternative hibride de tip “grey box”*, bazată pe tehnici de Inteligență Artificială (Rețele Neuronale Artificiale) în vederea determinării valorilor de flux termic corespunzătoare rezolvării legii lui Fourier și a ecuației căldurii în regim staționar și nestaționar fără surse de căldură, în vederea reducerii timpului necesar analizei;
- ❖ Sistematizarea informațiilor privind modul de implementare a Rețelelor Neuronale Artificiale;
- ❖ Propunerea a 36 de configurații distincte de rețele neuronale artificiale feedforward multistrat în utilitarul MatLab (Neural Network toolbox);
- ❖ Testarea performanței rețelelor prin determinarea valorilor medii și maxime ale erorilor pentru valorile fluxului termic orar predicționat raportat la valorile obținute cu analiză MEF pe modelul numeric de referință din *subcap. 4.3.2*;
- ❖ Testarea performanței rețelelor neuronale prin regresii liniare, cu determinarea unui coeficient de corelație între valorile de flux termic obținute de rețelele neuronale și cele obținute prin analiză numerică;

- ❖ Identificarea RNA celei mai performante și extinderea predicției la 20 de ani;
- ❖ Producerea unui *profil caracteristic (pattern)* modelului analizat, prin rezolvarea numerică a ecuațiilor caracteristice transferului de căldură, cu substituirea de la un anumit pas de timp a acestora cu o aplicație mult mai rapidă bazată pe tehnici de Inteligență Artificială, care rezolvă o problemă de tip *recunoașterea profilului (pattern recognition)* și predicționează valorile orare ale fluxului termic de la acel pas de timp până unde se dorește, constituie o *contribuție originală vis-à-vis de metodele de cercetare aplicabile acestui subiect*, de altfel destul de evitat utilizând metodele tradiționale convenționale, datorită limitelor deja menționate.

Contribuțiile personale aduse prin cea de-a doua aplicație propusă sunt sintetizate mai jos:

- ❖ Propunerea unei *metode alternative de tip "black box"*, bazată pe tehnici de Inteligență Artificială (Rețele Neuronale Artificiale) pentru determinarea valorilor de flux termic corespunzătoare rezolvării legii lui Fourier și a ecuației căldurii în regim staționar și nestaționar fără surse de căldură, în vederea reducerii timpului necesar analizei;
- ❖ Propunerea a 52 de rețele neuronale artificiale feedforward multistrat (patru configurații distincte, utilizând 13 algoritmi de antrenare);
- ❖ Testarea arhitecturilor implementate, prin determinarea erorilor medii și maxime, și identificarea configurației optime a rețelei neuronale;
- ❖ Identificarea unor caracteristici cu caracter general (stabilitate, factori de sensibilitate) pentru algoritmi de antrenare utilizați;
- ❖ Fundamentarea ideii prin care rezultatele valorilor de flux termic orar pentru mai multe dimensiuni obținute prin analiză numerică să reprezinte variabile explicative și variabile răspuns pentru RNA, care să permită, prin generalizare, determinarea pentru intervale lungi de timp a răspunsului termic pentru o dimensiune a plăcii pe sol, distinctă față de dimensiunile ale căror valori ale fluxului termic au fost utilizate pentru antrenarea rețelelor neuronale, prin această aplicație în Inteligență Artificială, constituie o altă *contribuție originală vis-à-vis de metodele de cercetare aplicabile acestei tematici caracteristice termotehnicii construcțiilor*.

Capitolul 6

Principalele concluzii care se desprind din studiile de caz efectuate și care au potențială aplicabilitate la scară largă, prin generalizarea lor, în ipoteza introducerii lor într-o metodologie de evaluare a performanței energetice a clădirilor nerezidențiale, și care reprezintă *contribuții aplicative* în cadrul tezei, prin acest capitol, sunt:

- ❖ Importanța gradului de ocupare al clădirilor, care influențează în mod semnificativ rezultatele analizei energetice. Dacă se consideră în calculul clădirii reale ipoteza utilizării clădirii la capacitatea din proiect, pot interveni erori ale rezultatelor, de tipul:
 - consumuri specifice mai mari și nerealiste, certificatul de performanță energetică nemaifiind un instrument util de informare a proprietarului clădirii vis-à-vis de profilul energetic real al clădirii;

- erori în analiza energetică și tehnico-financiară, în sensul stabilirii unor economii potențiale de energie și a unor costuri ale investițiilor, care nu vor fi reale în momentul aplicării investiției, cu potențiale efecte negative, mai ales dacă investițiile sunt din bani publici sau din fonduri europene.

În baza acestei observații, se recomandă ca în certificatul de performanță energetică al clădirilor nerezidențiale să se specifice gradul de ocupare mediu din ultimul an acolo unde se pretează, corelat cu destinația clădirii (grad de ocupare al spațiilor de cazare – în cazul hotelurilor, grad de ocupare al paturilor - în cazul unităților medicale de tip spital, etc.);

- ❖ Potențialul de economie de energie poate varia semnificativ de la o clădire la alta, chiar dacă destinația clădirii este aceeași și principalele funcțiuni sunt similare;
- ❖ Reducerea necesarului de încălzire prin măsuri aplicate clădirilor, ca o primă etapă în procesul de modernizare complexă a clădirii și transformare în NZEB, are un impact semnificativ în datele de intrare necesare proiectării instalațiilor, astfel că se impun modele riguroase de calcul termotehnic al construcțiilor, care să fie preluate în etapa de dimensionare a instalațiilor;
- ❖ Un rol esențial în transformarea în clădire cu consum de energie aproape egal cu zero îl au instalațiile, astfel că, printr-o proiectare integrată (construcții și instalații) s-a ajuns la economii importante de energie din surse convenționale, economii majorate și mai mult prin producerea de energie din surse neregenerabile;
- ❖ Durata de amortizare a investiției este semnificativ mai redusă față de cea rezultată din analizele energetice curente, așadar cu un impact pozitiv asupra conceptului, dar și cu obligativitatea utilizării unor modele de calcul mult mai detaliate;
- ❖ Se subliniază *importanța introducerii metodelor numerice în procesul curent de proiectare termotehnică al detaliilor constructive*;
- ❖ Se subliniază importanța specificării caracteristicilor de performanță energetică a echipamentelor și transmiterea către echipa de proiectare de către specialistul care efectuează aceste analize pentru a exista un real control asupra viitoarelor consumuri de energie. În acest sens, detalierea și descrierea specificațiilor tehnice pentru anvelopa clădirii, instalații și surse regenerabile de energie efectuate în *subcap. 6.3.2.5* reprezintă o *propunere de conținut-cadru minimal în Auditul Energetic, privind nivelul de detaliere al soluțiilor integrate de eficientizare energetică a clădirii*, referitor atât la conformarea anvelopei clădirii, cât și la parametrii de performanță energetică impuși pentru principalele echipamente de instalații și SRE, cu scopul obligării proiectanților să le preia din Auditul Energetic, ca ulterior să le dezvolte în proiectul tehnic, pe specialități. O asemenea abordare are scopul de a asigura o *colaborare interdisciplinară riguroasă între auditorul energetic - specialistul care are competențele de identificare a soluțiilor de eficientizare energetică, respectiv de evaluare a modului în care energia se consumă în clădiri, și proiectanții pe specialități* – care au competențele de proiectare a soluțiilor tehnice și echipamentelor identificate și propuse de către auditorul energetic, cu scopul final și nobil de reducere al consumului de energie în clădiri, într-o manieră controlată.
- ❖ Elaborarea unor modele dinamice suficient de detaliate (analiză detaliată efect punți termice, calcul multizonal, calcul cu intermitență) demonstrează că utilizarea metodelor

lunare în efectuarea bilanțului termic pentru determinarea consumului de încălzire poate substitui cu succes utilizarea metodelor orare, având ca referință consumul real înregistrat al clădirii. O calibrare corectă a modelului inițial de calcul (pentru clădirea reală), reprezintă o bază riguroasă bună pentru viitoare predicții de consum de energie aferente modelelor de calcul care simulează implementarea soluțiilor de eficientizare energetică.

7.3 Diseminare rezultate

- 1) [140] A. M. Măgurean, L. Czumbil, D. L. Manea, and D. D. Micu, “Artificial Intelligence Based Prediction Model for the Long-Term Heat Flux Losses Through Ground Applied to Large Non-Residential Buildings,” in *12th International Conference INTER-ENG 2018, Procedia Manufacturing*, 2019
- 2) [144] A. M. Măgurean, “Case Study of NZEB Implementation Into an Early Stage of the Design Phase for a New Residential Building,” in *12th International Conference INTER-ENG 2018, Procedia Manufacturing*, 2019.
- 3) [77] A. M. Măgurean, “An analysis of the influence of emissivity in the heat transfer for constructive details specific to insulated sandwich panels under summer and winter conditions,” in *C65 International Conference: Tradition and Innovation - 65 Years of Constructions in Transilvania*, 2018
- 4) [45] S. Varga, H.-A. Petran, A. M. Măgurean, N. Petre, and M.-C. Niculuță, “Thermal bridge free passive house foundation design in the Romanian seismic region,” in *Conference Proceedings of the 21st International Passive House Conference, Vienna, Austria*, 2017.
- 5) [47] A. M. Măgurean, L.-M. Lupan, and I. Moga, “Insulated Sandwich Panels - Thermal performance,” in *Proceedings of the Second International Conference for PhD Students in Civil Engineering and Architecture (CE-PhD 2014)*, 2014, pp. 477–482.
- 6) [46] L.-M. Lupan, A. M. Măgurean, and I. Moga, “Analiza comparativă a metodelor de calcul pentru rezistența termică corectată a elementelor de construcție din structură de oțel,” in *Conferința internațională C60: Tradiție și inovare - 60 de ani de construcții în Transilvania*, 2013.
- 7) [156] A. M. Măgurean, “Aspecte negative în reabilitarea termică a fondului de clădiri existent,” in *Sesiune Națională de Comunicări Științifice Studentești, Facultatea de Construcții, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, 2009. (Premiu obținut: Mențiune)

Articole științifice în proces de susținere și publicare:

- [167] A. M. Măgurean, “Evaluation of the thermal performance of composite insulated panels with metallic skin through steady-state numerical analysis - Part 1,” in *International*

Conference Computational Civil Engineering 2019, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 2019.

- [168] A. M. Măgurean, “Evaluation of the thermal performance of composite insulated panels with metallic skin through steady-state numerical analysis – Part 2,” in *International Conference Computational Civil Engineering 2019, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 2019.*

Intenție de publicare în jurnale ISI:

- În *Building and Environment* (Factor de Impact 4.539 –an 2017, 5.221 – 5 ani) conținutul capitolului 4;
- În *Energy and Buildings* (Factor de Impact 4.457 – an 2017; 4.779 – 5 ani) conținutul subcapitolului 5.3.

7.4 Direcții viitoare de cercetare

- ⊕ Efectuarea unor studii comprehensive al transferului de căldură între clădire și sol în regim nestaționar, simultan cu studiul transferului de umiditate, inclusiv cu studierea efectelor fenomenelor de evo-transpirație și îngheț-dezgheț asupra procesului de transfer termic. Acest tip de analize implică introducerea de condiții de contur neliniare în modelele numerice;
- ⊕ Elaborarea unui model analitic specific clădirilor de dimensiuni mari pentru calculul pierderilor de căldură prin sol ale clădirii;
- ⊕ Studiul efectului de acumulare progresivă de căldură la plăcile pe sol de dimensiuni mari în funcție de dimensiunea plăcii;
- ⊕ Fundamentarea altor aplicații utilizând rețele neuronale artificiale în analiza performanței energetice a clădirilor, pentru analize dinamice la nivel de clădire, în vederea optimizării timpului de calcul, care în momentul de față pentru analize detaliate utilizând metodele tradiționale ingineresti este destul de lung;
- ⊕ Monitorizarea consumurilor de energie la clădiri cu soluții de eficientizare energetică implementate, în vederea efectuării de studii comparative cu rezultatele obținute în modelele de calcul.

BIBLIOGRAFIE

- [1] “SR EN ISO 10211:2017. Puncte termice în alcătuirea clădirilor. Fluxuri termice și temperaturi superficiale. Calcule detaliate,” București, 2017.
- [2] “SR EN ISO 13370:2017 Performanța termică a clădirilor. Transfer termic prin sol. Metode de calcul.,” 2017.
- [3] “C107/5-2005 Normativ privind calculul termotehnic al elementelor de construcție ale clădirilor, Partea a 5-a Normativ privind calculul termotehnic al elementelor de construcție în contact cu solul.” Editura Fast Print, 2005.
- [4] “MC 001/2006, Metodologie de calcul al performanței energetice a clădirilor.” Monitorul Oficial al României, Partea I nr. 126bis din 21/02/2007, 2006.
- [5] “United Nations Framework Convention on Climate Change.” [Online]. Available: <http://unfccc.int/> United Nations Framework Convention on Climate Change.
- [6] BP, “Statistical Review of World Energy.” [Online]. Available: www.bp.com.
- [7] Institutul Național de Statistică, “Baza de date – Indicatori de Dezvoltare Durabilă în România (IDDR).” [Online]. Available: http://www.insse.ro/cms/files/Web_IDD_BD_ro/index.htm. [Accessed: 20-Sep-2017].
- [8] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.iea.org/> International Energy Agency.
- [9] “Directiva 2012/27/UE a Parlamentului European și a Consiliului din 25 octombrie 2012 privind eficiența energetică, de modificare a Directivelor 2009/125/CE și 2010/30/UE și de abrogare a Directivelor 2004/8/CE și 2006/32/CE.” [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=CELEX:32012L0027>.
- [10] International Energy Agency (IEA), “World energy balances: Overview,” *WORLD ENERGY BALANCES*, 2017. [Online]. Available: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-balances--2017-edition---overview.html>.
- [11] J. D. Sutter, “Is 2 degrees the wrong climate goal?,” *CNN*, 2015. [Online]. Available: <http://edition.cnn.com/2015/12/08/opinions/sutter-1-5-degrees-climate-cop21/index.html>. [Accessed: 21-Sep-2017].
- [12] “Directiva 2002/91/CE a Parlamentului European și a Consiliului din 16 decembrie 2002 privind performanța energetică a clădirilor,” *Jurnalul Oficial al Uniunii Europene. Vol. 002*, 2003. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=CELEX:32002L0091>.
- [13] “Directiva 2006/32/CE a Parlamentului European și a Consiliului din 5 aprilie 2006 privind eficiența energetică la utilizatorii finali și serviciile energetice și de abrogare a Directivei 93/76/CEE a Consiliului,” *Jurnalul Oficial al Uniunii Europene. Vol. 002*, 2006. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/ALL/?uri=CELEX:32006L0032>.
- [14] “Directiva 2010/31/UE a Parlamentului European și a Consiliului din 19 mai 2010 privind performanța energetică a clădirilor (reformare),” *Jurnalul Oficial al Uniunii Europene. Vol. 003*, 2010. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ro/TXT/?uri=CELEX:32010L0031>.
- [15] U.S. Department of Energy, “Statutory Rules and Authorities.” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/buildings/statutory-rules-and-authorities>.
- [16] J. Laustsen, “Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings - IEA Information Paper,” *International Energy Agency (IEA)*, no. March. 2008.
- [17] *Executive Order 13514—Federal Leadership in Environmental, Energy, and Economic*

- Performance*. <http://www.presidency.ucsb.edu/ws/index.php?pid=86728>, 2009.
- [18] *Executive Order 13693 - Planning for Federal Sustainability in the Next Decade*. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2015-03-25/pdf/2015-07016.pdf>, 2015.
- [19] *Executive Order 13834 Regarding Efficient Federal Operations*. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-regarding-efficient-federal-operations/>, 2018.
- [20] *Legea 372/2005 privind performanța energetică a clădirilor*. Monitorul Oficial al României, Partea I nr. 1144 din 19/12/2005, 2005.
- [21] *Legea 372/2005 privind performanța energetică a clădirilor - republicată*. Monitorul Oficial al României, Partea I, nr. 451/23.VII.2013, 2013.
- [22] *Ordonanța nr. 13/2016 pentru modificarea și completarea Legii nr. 372/2005 privind performanța energetică a clădirilor*. Monitorul Oficial al României, Partea I, nr. 68/29.01.2016, 2016.
- [23] “Optimizarea soluțiilor constructive și de plan-volum pentru construcții industriale și instalații aferente, din punct de vedere al economiei de energie,” in *Al VI-lea Simpozion Internațional*, 1981.
- [24] “Energieeinsparverordnung, EnEV2014,” 2014. [Online]. Available: www.enev-online.com.
- [25] Höttinger K, Maas A., and Hauser G., “German Energy Conservation Regulation - basics and examples,” in *Research in Building Physics: Proceedings of the 2nd International Conference on Building Physics*, 2003, pp. 637–644.
- [26] “EnEV 2014 – Anlage 7 (zu 16), ‘Energieausweis für Nichtwohngebäude gemäss den 16 ff. der Energieeinsparverordnung (EnEV) vom 2014,’” 2014.
- [27] ASHRAE, *ASHRAE Handbook – Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA, 1993.
- [28] “C107/2-2005 Normativ privind calculul termotehnic al elementelor de construcție ale clădirilor, Partea a 2-a Normativ privind calculul coeficienților globali de izolare termică la clădirile cu altă destinație decât cea de locuire.” Editura Fast Print, București, 2005.
- [29] *Ordinul nr. 2513/2010 pentru modificarea Reglementării tehnice Normativ privind calculul termotehnic al elementelor de construcție ale clădirilor, indicativ C107-2005, aprobată prin Ordinul ministrului transporturilor, construcțiilor și turismului nr. 205. 2010.*
- [30] *Ordinul 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.* 2017.
- [31] “Nearly Zero Energy Buildings (NZEB) România - Plan de creștere a numărului de clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero,” 2014. [Online]. Available: http://www.mdrap.ro/userfiles/metodologie_calcul_performanta_energetica_iulie2014.pdf.
- [32] *Ordinul nr. 386/2016 pentru modificarea și completarea Reglementării tehnice “Normativ privind calculul termotehnic al elementelor de construcție ale clădirilor”, indicativ C 107-2005.* Monitorul Oficial al României, nr. 306 din 21/04/2016, 2016.
- [33] “SR EN ISO 13790:2008, Energy performance of buildings -- Calculation of energy use for space heating and cooling.”
- [34] “SR EN ISO 13789:2017 Performanța termică a clădirilor. Coeficienți de transfer termic prin transmisie și ventilare. Metodă de calcul.” 2017.
- [35] C. Richarz and C. Schulz, “Energy efficiency refurbishments: Principles, Details, Case studies,” Detail Gre., Munchen: Detail Green Books, 2013, p. 143.
- [36] C. Kempkes, C. Kempkes, and A. Maas, “Application of the EU Directive for Energy Efficiency in Buil,” in *10th International Symposium on District Heating and Cooling*,

- 2006.
- [37] C. Reiser, R. David, M. Faigl, and O. Baumann, "DIN 18599 – Accounting for Primary Energy New Code Requires Dynamic Simulation," *SimBuild 2008*, pp. 170–173, 170AD.
- [38] Bundesgesetzblatt, "Zweite Verordnung zur Änderung der Energiesparverordnung," 2013.
- [39] R. Mitchell *et al.*, "THERM 7 / WINDOW 7 NFRC Simulation Manual," *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2016. [Online]. Available: <http://nfrccommunity.sitem.com/?page=Techdocs>. [Accessed: 07-Mar-2018].
- [40] I. Moga and L. Moga, *Punți termice specifice clădirilor cu pereți structurali din zidărie*. U.T. Press, Cluj-Napoca, 2013.
- [41] "Anexa la Ordinul nr. 1590/2012 pentru modificarea și completarea Reglementării C107/3-2005: Catalog cu punți termice specifice clădirilor." p. 837, 2012.
- [42] "SR EN 14683:2018 - Punți termice în alcătuirea clădirilor. Transmitanța termică liniară. Metode simplificate și valori implicite," 2018.
- [43] Infomind Sarl, "Catalogue des ponts thermiques," Office federal de l'energie (OFEN), Ed. Suisse Energie, Zurich, 2003.
- [44] A. Iacob, "Atlas de punți termice," Teză de doctorat. Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" Iași, 2012.
- [45] S. Varga, H.-A. Petran, A. M. Măgurean, N. Petre, and M.-C. Niculuță, "Thermal bridge free passive house foundation design in the Romanian seismic region," in *Conference Proceedings of the 21st International Passive House Conference 2017*, 2017.
- [46] L.-M. Lupan, A. M. Măgurean, and I. Moga, "Analiza comparativă a metodelor de calcul pentru rezistența termică corectată a elementelor de construcție din structură de oțel," in *Conferința internațională C60: Tradiție și inovare - 60 de ani de construcții în Transilvania*, 2013.
- [47] A. M. Măgurean, L.-M. Lupan, and I. Moga, "Insulated Sandwich Panels - Thermal performance," in *Proceedings of the Second International Conference for PhD Students in Civil Engineering and Architecture (CE-PhD 2014)*, 2014, pp. 477–482.
- [48] J. Kosny and J. E. Christian, "Thermal evaluation of several configurations of insulation and structural materials for some metal stud walls," *Energy Build.*, vol. 22, no. 2, pp. 157–163, 1995.
- [49] E. De Angelis and E. Serra, "Light steel-frame walls: Thermal insulation performances and thermal bridges," *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 362–371, 2014.
- [50] L.-M. Lupan, "Contribuții privind proiectarea clădirilor civile pe structură metalică eficiente energetic," Teză de doctorat. Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2015.
- [51] H. M. Kunzel, "Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters," PhD Thesis, Fraunhofer Institute of Building Physics, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 1995.
- [52] S. A. Al-Sanea and M. F. Zedan, "Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions," *Appl. Energy*, vol. 98, pp. 584–593, 2012.
- [53] F. Hubalowsky, "Principii ale proiectării clădirilor industriale ușoare sub aspectul optimizării consumurilor energetice în exploatare," in *Al VI-lea Simpozion Internațional: Optimizarea soluțiilor constructive și de plan-volum pentru construcții industriale și instalații aferente, din punct de vedere al economiei de energie*, 1981, pp. 110–114.
- [54] K. Martin, C. Escudero, A. Erkoreka, I. Flores, and J. M. Sala, "Equivalent wall method for dynamic characterisation of thermal bridges," *Energy Build.*, vol. 55, pp. 704–714, 2012.

-
- [55] A. Tadeu, I. Simões, N. Simões, and J. Prata, "Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain," *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3685–3695, 2011.
- [56] K. Martin, A. Campos-Celador, C. Escudero, I. Gomez, and J. M. Sala, "Analysis of a thermal bridge in a guarded hot box testing facility," *Energy Build.*, vol. 50, pp. 139–149, 2012.
- [57] J. M. Hart, "A Practical Guide to Infra-Red Thermography for Building Surveys," BRE Press, Watford, 1991.
- [58] C. Pearson, "Thermal Imaging of Building Fabric – A Best Practice Guide for Continuous Insulation," BSRIA, Berkshire, 2002.
- [59] J. Snell and R. Spring, "Nondestructive Testing of Building Envelope Systems Using Infrared Thermography," Inframation, Montpellier, 2002.
- [60] J. Hopper *et al.*, "Assessing retrofitted external wall insulation using infrared thermography," *Struct. Surv.*, vol. 30, no. 3, pp. 245–266, 2012.
- [61] F. Asdrubali, G. Baldinelli, and F. Bianchi, "A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings," *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 365–373, 2012.
- [62] "MP 037/2004 - Metodologie privind determinările termografice în construcții," Monitorul Oficial al României, Partea I nr. 405 din 06/05/2004, 2004.
- [63] M. N. Velea, "Structuri celulare avansate pentru proiectarea multifuncțională și construcția panourilor de tip sandwich," Teză de doctorat. Universitatea Transilvania din Brașov, 2011.
- [64] E. Mastrapostoli, T. Karlessi, A. Pantazaras, D. Kolokotsa, K. Gobakis, and M. Santamouris, "On the cooling potential of cool roofs in cold climates: Use of cool fluorocarbon coatings to enhance the optical properties and the energy performance of industrial buildings," *Energy Build.*, vol. 69, pp. 417–425, 2014.
- [65] C. Castellon *et al.*, "Comparison of manufacturing techniques to use microencapsulated phase change materials in sandwich panels - experimental study," in *Abstract Book and Proceedings of 11th International Conference on Thermal Energy Storage for Energy Efficiency and Sustainability (Effstock 2009)*, 2009.
- [66] A. Carbonari, M. De Grassi, C. Di Perna, and P. Principi, "Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls," *Energy Build.*, no. 38, pp. 472–483, 2006.
- [67] M. V. Pop, *Construcții industriale*. Institutul Politehnic Cluj-Napoca, Facultatea de Construcții.
- [68] IPCT, *Nomenclator de elemente prefabricate din beton armat si beton precomprimat, vol.1: Elemente privind construcții industriale proiectate de IPCT: catalog IPCT*. București: IPCT, 1990.
- [69] E. I. Ignaton, "Contribuții la studiul și cercetarea elementelor de închidere din beton armat pentru construcții industriale și agricole," Universitatea Tehnică din Timișoara, 1994.
- [70] ***, "No Title." [Online]. Available: <http://powerpanel.kingspan.info>.
- [71] E. Finlayson, R. Mitchell, D. Arastesh, C. Huizenga, and D. Curcija, "THERM 2.0: for analyzing Two-Dimensional Heat Transfer Through Buildings Products," Berkeley, California, LBL-37371 Rev. 2 TA-338, 1998.
- [72] A. M. Măgurean and L. Czumbil, "Modul 2. Curs 3. Introducere în calculul detaliat al punctelor termice cu ajutorul programului THERM," 2016. [Online]. Available: <http://www.mens-nzeb.eu/ro/education/distant-learning/courses/636026654825091733/>.
- [73] "SR EN 14683:2018, Punți termice în alcătuirea clădirilor. Transmitanța termică liniară. Metode simplificate și valori implicite." 2018.

- [74] “SR EN ISO 10077/2:2012 Performanța termică a ferestrelor, ușilor și obloanelor. Calculul coeficientului de transfer termic. Partea 2: Metoda numerică pentru profilurile de tâmplărie.”
- [75] “SR EN ISO 6946:2017, Componente și elemente de clădire. Rezistența termică și transmitanța termică. Metode de calcul,” 2017.
- [76] European Commission Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel Technical Group: TGS8, “Structural Applications of Ferritic Stainless Steels (SAFSS),” RFSR-CT-2010-00026, 2014.
- [77] A. M. Măgurean, “An analysis of the influence of emissivity in the heat transfer for constructive details specific to insulated sandwich panels under summer and winter conditions,” in *C65 International Conference "Tradition and Innovation - 65 Years of Constructions in Transilvania"*, 2018.
- [78] “ET ISO 15099 (2003) (English): Thermal performance of windows, doors and shading devices -- Detailed calculations,” 2003.
- [79] A. M. Măgurean, “Aspecte privind performanțele termice ale unei clădiri industriale,” Lucrare de disertație. Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2012.
- [80] N. P. Leonăchescu, *Transferul căldurii între construcții și sol - Volumul 1*. Editura Tehnică, București, 1981.
- [81] N. P. Leonăchescu, *Transferul căldurii între construcții și sol - Volumul 2*. Editura Tehnică, București, 1989.
- [82] D. Hillel, *Introduction to Soil Physics*. Academic Press, San Diego, CA, 1982.
- [83] M. C. Bălan, T. P. Todoran, S. D. Bolboacă, and L. Jäntschi, “Assessments about soil temperature variation under censored data and importance for geothermal energy applications. Illustration with Romanian data,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, 2013.
- [84] J. Wu and D. L. Nofziger, “Incorporating temperature effects on pesticide degradation into a management model,” *J. Environ. Qual.* 2892-100, 1999.
- [85] J.-B.-J. Fourier, *Theorie analytique de la chaleur*, vol. XXX. L’Imprimerie de Firmin Didot, Imprimeur du Roi, de l’Institut et de la Marine, Paris, France, 1822.
- [86] L. Gavrilă, *Fenomene de transfer. Transfer de căldură și de masă*, vol. II. Editura Alma Mater, Bacău, 2000.
- [87] A. A. Badea, *Bazele transferului de căldură și de masă*. Editura Academiei Române, București, 2004.
- [88] E. Comșa, “Contribuții privind dimensionarea diafragmelor și a elementelor de închidere neomogene la transfer de căldură,” Teză de doctorat, Institutul Politehnic Cluj-Napoca, 1978.
- [89] D. D. Micu, A. Ceclan, L. Czumbil, and D. Csala, *Metode numerice. Lucrari practice*. MEDIAMIRA, 2010.
- [90] T. J. Chung, *Computational Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2002.
- [91] E. Panțel and C. Bia, *Metoda elementelor finite pentru structuri de rezistență*. Editura Todesco, Cluj-Napoca, 2009.
- [92] W. B. J. Zimmerman, *Process Modelling and Simulation with Finite Element Methods*, Series on. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004.
- [93] H. Sonnerlind, “How to Make Boundary Conditions Conditional in Your Simulation,” 2016. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-make-boundary-conditions-conditional-in-your-simulation/>. [Accessed: 03-Apr-2018].
- [94] C. Petcu, “Contribuții la analiza energetică multiparametrică a anvelopei și a sistemelor de management al microclimatului din clădiri,” Teză de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcții București, 2009.

-
- [95] M. Sen, “Analytical Heat Transfer,” *Book*, 2008. [Online]. Available: www.nd.edu/~msen/IntHT.pdf. [Accessed: 27-Feb-2018].
- [96] W. Bahnfleth and C. Pedersen, “A Three-Dimensional Numerical Study of Slab-on-Grade Heat Transfer,” *ASHRAE Transactions*, 96(2):61–72, 1990.
- [97] Q. de Jong van Lier and A. Durigon, “Soil thermal diffusivity estimated from data of soil temperature and single soil component properties,” *Rev. Bras. Ciência do Solo*, vol. 37, no. 1, pp. 106–112, Feb. 2013.
- [98] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*. 2.ed., Oxford University Press, Oxford, UK, 1959.
- [99] S. Mottin, “The solution of the Laplace equation with the Robin boundary conditions : Applications to inverse problems,” *eprint arXiv:1503.05476*, pp. 1–18, 2015.
- [100] G. N. Walton, “Thermal Analysis Research Program Reference Manual,” National Bureau of Standards, NBSSIR 83-2655, 1983.
- [101] I. Beausoleil-Morrison, “The adaptive coupling of heat and air flow modeling within dynamic whole-building simulations,” University of Strathclyde, Glasgow, UK, 2000.
- [102] S. Fohanno and G. Polidori, “Modelling of natural convective heat transfer at an internal surface,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 5, pp. 548–553, 2006.
- [103] EnergyPlus, *Engineering Reference*. US Department of Energy, 2010.
- [104] E. M. Sparrow, J. W. Ramsey, and E. A. Mass, “Effect of finite width on heat transfer and fluid flow about an inclined rectangular plate,” *J. Heat Transfer*, vol. 101, no. 2, pp. 199–204, 1979.
- [105] N. Kruis, “Development and Application of a Numerical Framework for Improving Building Foundation Heat Transfer Calculations,” Ph.D. Thesis, University of Colorado, USA, 2015.
- [106] M. G. Larson and F. Bengzon, *The Finite Element Method: Theory, Implementation, and Practice*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [107] J. E. Akin, *Finite Element Analysis with Error Estimators*. Great Britain: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [108] D. de Vries, *Heat Transfer in Soils*. In: *de Vries, D.A. and Afgan, N.H. Eds. Heat and Mass Transfer in the Biosphere, Part 1 Transfer Processes in the Plant Environment*. New York: Willey & Sons, John, 1975.
- [109] T. Kusuda and P. R. Achenbach, “Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States,” in *ASHRAE Transactions*, 1965, no. 73, pp. 61–75.
- [110] H. Janssen, J. Carmeliet, and H. Hens, “The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground,” *Build. Environ.*, vol. 39, no. 7, pp. 825–836, 2004.
- [111] ***, “PARDISO.” [Online]. Available: <https://pardiso-project.org/>. [Accessed: 15-Feb-2018].
- [112] O. Schenk and K. Gartner, “Solving unsymmetric sparse systems of linear equations with PARDISO,” in *Future Generation Computer Systems*, 2004, vol. 20, no. 3, pp. 475–487.
- [113] ***, “Intel Math Kernel Library.” [Online]. Available: <https://software.intel.com/en-us/mkl>. [Accessed: 15-Feb-2018].
- [114] Y. Saad and M. H. Schultz, “GMRES: A Generalized Minimal Residual Algorithm for Solving Nonsymmetric Linear Systems,” *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, vol. 7, no. 3, pp. 856–869, 1986.
- [115] A. Greenbaum, *Iterative Methods for Solving Linear Systems*. SIAM, Philadelphia, USA, 1997.
- [116] K. J. Kim and S. B. Cho, “Ensemble classifiers based on correlation analysis for DNA microarray classification,” *Neurocomputing*, vol. 70, no. 1–3, pp. 187–199, 2006.
- [117] S. Kang, P. Kang, T. Ko, S. Cho, S. Rhee, and K.-S. Yu, “An efficient and effective

- ensemble of support vector machines for anti-diabetic drug failure prediction,” *Expert Syst. Appl. Artif. Intell.*, no. 42(9):4265-73, 2015.
- [118] J. Xu, Y. Wang, and L. Xu, “PHM-oriented integrated fusion prognostics for aircraft engines based on sensor data,” *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 4, pp. 1124–1132, 2014.
- [119] J. S. Chou and A. D. Pham, “Enhanced artificial intelligence for ensemble approach to predicting high performance concrete compressive strength,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 554–563, 2013.
- [120] D. D. Micu, L. Czumbil, G. Christoforidis, and A. Ceclan, “Layer recurrent neural network solution for an electromagnetic interference problem,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 1410–1413.
- [121] D. A. N. D. Micu, L. Czumbil, G. Christoforidis, and E. Simion, “NEURAL NETWORKS APPLIED IN ELECTROMAGNETIC,” *Rev. Roum. des Sci. Tech. Ser. Electrotech. Energ.*, pp. 162–171, 2012.
- [122] S. Kalogirou and M. Bojic, “Artificial neural networks for the prediction of the energy consumption of a passive solar building,” *Energy*, vol. 25, no. 5, pp. 479–491, 2000.
- [123] J. F. Kreider, “Artificial neural networks demonstration for automated generation of energy use predictors for commercial buildings,” *Ashrae Trans.*, vol. 97, no. 1, pp. 775–779, 1991.
- [124] A. H. Neto and F. A. S. Fiorelli, “Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 12, pp. 2169–2176, 2008.
- [125] B. B. Ekici and U. T. Aksoy, “Prediction of building energy consumption by using artificial neural networks,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, no. 5, pp. 356–362, 2009.
- [126] Z. Wang and R. S. Srinivasan, “A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. September 2015, pp. 796–808, 2017.
- [127] C. Voloșencu, *Sisteme fuzzy si neuronale*. Editura Politehnica, Timișoara, 2007.
- [128] L.-N. Ivanciu, “Sisteme inteligente de suport decizional. Curs 6 - Rețele Neuronale Artificiale.” [Online]. Available: http://www.bel.utcluj.ro/dce/didactic/sisd/SISD_curs_6_Retele_Neuronale_Artificiale.pdf.
- [129] M. T. Hagan, H. B. Demuth, and M. H. Beale, “Neural Network Design,” *eBook*, 1995. [Online]. Available: <http://hagan.okstate.edu/nnd.html>.
- [130] M. Hudson Beale, M. T. Hagan, and H. B. Demuth, “MATLAB Neural Network Toolbox User’s Guide,” The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, 2018.
- [131] L. Jin, M. M. Gupta, and P. N. Nikiforuk, “Approximation capabilities of feedforward and recurrent neural networks,” in *Intelligent Control Systems*, IEEE Press, 1996, pp. 234–264.
- [132] M. F. Moller, “A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning,” *Neural Networks*, vol. 6, pp. 525–533, 1993.
- [133] C. Charalambous, “Conjugate gradient algorithm for efficient training of artificial neural networks,” *IEEE Proc.*, vol. 139, no. 3, 1992.
- [134] F. Dan Foresee and M. T. Hagan, “Gauss-Newton approximation to bayesian learning,” in *IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings*, 1997, vol. 3, pp. 1930–1935.
- [135] J. Hertz, A. Krogh, and R. G. Palmer, *Introduction to the theory of neural computation*. Addison-Wesley Publishing Co., Redwood Cliffs, USA, 1991.
- [136] M. Horný, “Bayesian networks: A Technical report,” no. 5, p. 15, 2014.
- [137] xxx, “Bayesian networks - an introduction.” [Online]. Available: https://www.bayesserver.com/docs/introduction/bayesian-networks#_parameter-

- learning. [Accessed: 06-Aug-2018].
- [138] D. J. C. MacKay, “Bayesian Interpolation,” *Neural Comput.*, vol. 4, no. 3, pp. 415–447, 1992.
- [139] D. Cautiș, “Philosophical considerations in Artificial Intelligence - Correlation, causation and Bayesian networks,” 2018. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=0pqcbiGPu4U>. [Accessed: 07-Jun-2018].
- [140] A. M. Măgurean, L. Czumbil, D. L. Manea, and D. D. Micu, “Artificial Intelligence Based Prediction Model for the Long-Term Heat Flux Losses Through Ground Applied to Large Non-Residential Buildings,” in *12th International Conference INTER-ENG 2018, Procedia Manufacturing*, 2019.
- [141] A. Fouquier, S. Robert, F. Suard, L. Stéphan, and A. Jay, “State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 272–288, 2013.
- [142] “Status Quo Analysis Report, BUILD UP Skills – Romania project,” 2012. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/build-skills-ro>.
- [143] EPBD, “The Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings,” in *Official Journal of the European Union*, 2010.
- [144] A. M. Măgurean, “Case study of nearly Zero Energy Building (nZEB) concept implementation into an early stage of the the design phase for a new residential building,” in *12th International Conference - INTER-ENG 2018 , Procedia Manufacturing*, 2019.
- [145] “Meeting of Energy Professional Skills.” [Online]. Available: <http://www.mens-nzeb.eu/en/>.
- [146] ***, “Training information report,” Meeting of Energy Skills, 2015.
- [147] H.-A. Petran, M.-C. Niculuță, and C. Petcu, “Nearly Zero Energy Communities,” in *Conference on Sustainable Energy*, 2018, no. January, pp. 651–665.
- [148] ***, “The Building Knowledge Hubs. Advanced practical training for 21st century construction, Train-to-NZEB (H2020-grant agreement No 649810), March 2018, Available: http://www.train-to-nzeb.com/uploads/9/8/8/4/9884716/train_to_nzeb_brochure_online.pdf.”
- [149] “Fit-to-nZEB.” [Online]. Available: <http://www.fit-to-nzeb.com>.
- [150] ***, “Train-the-trainer (TTT) training programmes in all focus countries. Deliverable 3.3.”
- [151] L. Aelenei *et al.*, “New challenge of the public buildings: Nzeb findings from IEE RePublic-ZEB Project,” *Energy Procedia*, vol. 78, no. November 2015, pp. 2016–2021, 2015.
- [152] “Nearly Zero Energy Hotels.” [Online]. Available: <http://www.nezeh.eu/home/index.html>.
- [153] S. Tournaki, M. Frangou, T. Tsoutsos, and R. Morell, “Nearly Zero Energy Hotels–From European Policy to Real Life Examples: the neZEH Pilot Hotels,” in *EinB2014 - 3rd International Conference “ENERGY in BUILDINGS 2014,”* 2014.
- [154] H.-A. Petran, “Conceptul nZEB în România: inițiativă, scheme de formare profesională, rezultate, ... perspective,” 2016.
- [155] “Directiva (UE) 2018/844 a Parlamentului European și a Consiliului din 30 mai 2018 de modificare a Directivei 2010/31/UE privind performanța energetică a clădirilor și a Directivei 2012/27/UE privind eficiența energetică,” *Jurnalul Of. al Un. Eur.*, 2018.
- [156] A. M. Măgurean, “Aspecte negative în reabilitarea termică a fondului de clădiri existent,” in *Sesiune Națională de Comunicări Științifice Studentești, Facultatea de Construcții, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, 2009.

- [157] S. Knapton, "Energy scandal: misleading efficiency claims leading to huge bills for homeowners," *The Telegraph*, 02-May-2017.
- [158] "SR 4839:2014, Instalații de încălzire. Numărul anual de grade-zile."
- [159] "SR 1907-2:2014, Instalații de încălzire. Necesarul de căldură de calcul. Temperaturi interioare convenționale de calcul."
- [160] "NP 048/2000 Normativ pentru expertizarea termică și energetică a clădirilor existente și a instalațiilor de încălzire și preparare a apei calde de consum aferente acestora." 2000.
- [161] ***, "No Title." [Online]. Available: <https://www.iso-chemie.eu/en/sealing-solutions/>.
- [162] ***, "No Title." [Online]. Available: <https://www.isover.ro/produsele-isover>.
- [163] ***, "No Title." [Online]. Available: <https://www.hirsch-porozell.ro/>.
- [164] MDRAPFE, "Programul Operațional Regional 2014-2020. Condiții specifice de accesarea fondurilor în cadrul apelurilor de proiecte cu titlul POR/2016/3/3.1/B/1/7 Regiuni și POR/2016/3/3.1/B/1/BI - Axa Prioritară 3, Prioritatea de Investiții 3.1, Operațiunea B - Clădir." p. 58, 2017.
- [165] "SR EN ISO 10077/1:2008 Performanța termică a ferestrelor, ușilor și obloanelor. Calculul coeficientului de transfer termic. Partea 1: Generalități."
- [166] "SR EN 14825:2016 Aparate de condiționat aerul, grupuri de răcit lichide și pompe de căldură cu compresoare acționate cu motor electric, pentru încălzirea și răcirea spațiilor. Încercări și determinarea caracteristicilor în condiții de sarcină parțială și ."
- [167] A. M. Măgurean, "Evaluation of the thermal performance of composite insulated panels with metallic skin through steady-state numerical analysis - Part 1," in *International Conference Computational Civil Engineering 2019, IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019.
- [168] A. M. Măgurean, "Evaluation of the thermal performance of composite insulated panels with metallic skin through steady-state numerical analysis – Part 2," in *International Conference Computational Civil Engineering 2019, IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019.