

MODEL MATEMATIC DE ANALIZĂ A PARAMETRILOR TERMODINAMICI CARACTERISTICI SPAȚIILOR OCUPATE

*Dan Constantinescu, Horia Petran, Cristian Petcu**

REZUMAT

Este prezentat un model de calcul original, realizat de autorii articolului, aflat în curs de validare pe suportul modelelor experimentale la scară naturală realizate de INCERC. Modelul de calcul este util pentru analiza dinamică a comportamentului termic al clădirilor și pentru determinarea necesarului de căldură / frig în vederea menținerii spațiilor climatizate la temperatura de confort impusă. De asemenea, modelul poate cuantifica modificările pe care le produc reabilitările fațadei asupra microclimatului interior sau asupra necesarului de energie. Sunt prezentate exemple de date obținute cu ajutorul acestui model de calcul, aplicat pentru întregul an sau pentru intervalul de răcire, pe o climă reală și pentru dimensionarea instalației, pe întreaga clădire și pe incinte situate în diferite amplasări. Autorii atrag atenția asupra clădirilor cu anvelopă verticală vitrată, al căror necesar de energie pentru răcire este mult mai mare decât soluțiile clasice și al căror microclimat interior poate conduce la probleme de sănătate a ocupanților clădirii.

ABSTRACT

An original calculation program is presented, conceived by the authors of this paper, which is under validation on the support of the natural scale experimental models carried out by INCERC. The calculation model is useful in the dynamic analysis of the buildings thermal behaviour and in assessing the heat/cold demand in view of maintaining the air conditioning spaces at the required comfort temperature. The model can also quantify the modifications entailed by the façade upgrading on the indoor microclimate or on the energy demand. Examples of data obtained by using this calculation model are presented; this calculation model was used during the whole year or during the cooling period, on the support of a real climate and in the system sizing, on the whole building as well as on precincts differently located. The authors emphasize the aspect of the vertically all glazed envelope buildings whose cooling energy demand is much higher than in the traditional solutions, and the indoor climate of which may cause health problems to the building occupants.

Introducere

Lucrarea de față prezintă modele de analiză dinamică a comportamentului energetic al clădirilor existente și al celor aflate în stadiu de proiect, având ca scop creșterea performanței energetice a acestora pe toată durata anului.

Practic modelele de analiză care fac obiectul lucrării se adresează atât evaluării stării clădirilor existente, anterior aplicării soluțiilor tehnice de modernizare energetică, cât și ulterior aplicării acestor soluții. Față de cazul încălzirii clădirilor în care metoda de calcul lunar oferă rezultate în foarte bună concordanță cu modelul dinamic cu pas de timp orar [1], în cazul analizei compartimentului clădirilor în sezonul estival, aplicarea modelelor de calcul lunar conduce la abateri semnificative în raport cu abordarea dinamică

cu pas orar. Dacă în cazul încălzirii clădirilor, parametrul numit “număr de grade zile corectat” are o funcție de sinteză specială privind variația intervalului de încălzire a spațiilor ocupate, în cazul răcirii spațiilor utilizarea parametrului “grade-zile” alături de modele de calcul lunar anulează două efecte semnificative care sunt proprii regimului de funcționare a spațiilor ocupate, după cum urmează:

- amortizarea și defazarea undelor termice care străbat elementele de construcție opace caracterizate de capacitate termică și de perturbație structurală cauzată de prezență punților termice;
- neglijarea efectului de volant termic produs de elementele de construcție interioare caracterizate de modul propriu de transmisie a căldurii, de capacitatea termică

a zonelor active și de condițiile de contur care le conectează la domeniul conturului termodinamic al spațiilor ocupate.

Aceste simplificări, asociate modelului de tip analogie electrică utilizat în standardele europene preluate ca standarde naționale SR EN 13791 și 13792, generează erori neacceptabile atât în cazul determinării variației temperaturilor semnificative din spațiile ocupate cât și în cazul evaluării necesarului de răcire (sensibilă) a acestora. Atât analiza variației temperaturilor cât și a necesarului de răcire reprezintă rezultatul interacțiunii mediului exterior natural, prin parametri climatici reprezentativi, cu mediul interior ocupat sau nu. Caracterul aleator al solicitărilor termice datorate variației temporale a parametrilor climatici determină un răspuns cu aceeași caracteristică la nivelul spațiului, răspuns “filtrat” de funcția de transfer caracteristică anvelopei și asociat răspunsului de ordinul doi al elementelor de construcție interioare. Funcția de transfer nu poate fi descrisă de modelul analogic electric decât în cazul modelelor de tip “regim termic regulat – Kondratiev” utilizate pentru analize simplificate și cu limite bine cunoscute [2]. Metoda utilizată în lucrarea de față se bazează pe Răspunsul Termic Unitar al structurilor compozite [3] care include și efectul punților termice [4]. Simplificarea introdusă constă în utilizarea transferului unidimensional de căldură care prin medierea temperaturilor superficiale și generarea suprafețelor de transfer de căldură izoterme introduce o eroare de maxim 2,6 % în raport cu modelul spațial de transfer de căldură. Modelul de tip convoluțional între R.T.U și parametri reali ai mediului adiacent, generează un parametru virtual numit temperatură exterioară virtuală [5], [6] care își păstrează variația temporală independent de variația temperaturii interioare rezultante $\theta_i(t)$. Această proprietate oferă posibilitatea integrării analitice a ecuației de transfer de căldură de tip Kirchhoff – Fourier proprie elementelor de construcție interioare asociată ecuațiilor algebrice de bilanț termic ale aerului și elementelor de anvelopă. Modelul prezentat evită utilizarea unui coeficient de corecție, cel puțin discutabil, prezent în standardele europene preluate ca standarde

naționale, respectiv coeficientul de utilizare a „pierderilor de căldură”, care se bazează pe o prelucrare a modelului simplificat lunar. Altfel spus acest coeficient corectează situațiile în care apar depășiri semnificative ale temperaturii interioare setate și care nu sunt luate în considerare ca sursă de căldură pentru modificarea energiei interne a elementelor de construcție interioare. Fenomenologic anularea efectului menționat se obține prin intervenții de tipul ventilării mecanice sau naturale care nu se pot ignora din profilul zilnic funcțional al spațiilor analizate. Modelele prezentate în lucrările menționate, utilizează în exces elemente “intuitive” în dauna analizei bazate pe ecuațiile de bilanț termic care sunt întotdeauna ecuații de echilibru la nivelul fluxurilor termice având ca rezultat variația energiei interne a unui sistem (prima lege a termodinamicii). Adoptarea modelelor “energetice” ignoră faptul că orice mărime energetică reprezintă o rezultantă a operației de integrare pe intervale finite de timp care nu pot fi alese “a priori”. Chiar intenția de definire a intervalelor de timp demonstrează inconsistența modelelor adoptate în reglementări deoarece se bazează pe egalitatea fluxurilor caracterizate drept aporturi de căldură cu cele caracterizate drept pierderi de căldură. Această ipoteză sugerează invarianța la un moment dat a energiei interne și nu definește un capăt de interval de integrare sezonieră. De altfel în metodologia prezentată în normativul NP 048-2000, și preluată ca metodă “simplificată” în Mc 001-2006, intervalul de încălzire a spațiilor este definit prin egalarea temperaturilor interioară redusă și exterioară de referință care reprezintă parametrii admisibili în cazul utilizării unui model de tip de calcul lunar. În cazul răcirii spațiilor o astfel de condiție nu face decât să definească o succesiune de intervale de răcire a spațiilor și nu intervalul sezonier de răcire. Modelul de tip cvasistaționar utilizat în standardele europene va conduce la intervale de răcire și în lunile de iarnă chiar pentru clădiri cu configurație clasică (raport de vitrare < 0,30). Cele de mai sus, asociate cu validarea modelelor realizate de autori, validare aflată în curs pe suportul unei clădiri cu dotări solare pasive, și totodată cu lipsa de validare a modelelor de calcul

(cu referire la validarea experimentală) dezvoltate în standardele europene ne face să considerăm că se impune o abordare fenomenologică susținută de suportul unui program de calcul ușor de utilizat.

Modelul matematic de evaluare a variației parametrilor termodinamici din spațiile ocupate (în sezonul cald și) în lipsa instalațiilor de climatizare

Modelul elaborat se bazează pe ecuațiile fundamentale de bilanț de proprietate din spațiile ocupate. În funcție de aporturile de căldură din interiorul spațiilor ocupate și de degajările de umiditate în aceste spații (fie ca urmare a proceselor metabolice intense – fie ca urmare a unor procese tehnologice cu degajări importante de umiditate) procesele de transfer de proprietate pot fi considerate fie exclusiv procese de transfer de căldură (sensibilă) în cazul unor degajări de umiditate nesemnificative, fie procese de transfer de căldură și masă, caz în care variația umidității în spațiile ocupate este semnificativă și influențează determinant valoarea entalpiei aerului.

Evaluarea variației în timp a temperaturilor interioare, în special în sezonul cald, oferă informații utile atât în cazul clădirilor existente cât și în cazul clădirilor aflate în stadiul de proiect.

- În cazul clădirilor existente depășirea valorilor de temperatură și eventual a valorilor de umiditate care definesc starea de confort în spațiile ocupate, constituie un indicator calitativ esențial în scopul modernizării clădirilor. Prin modernizare se poate asigura, prin procedee pasive (protecție termică, protecție antiradiativă cu referire la radiația solară, utilizarea ventilării naturale organizate/neorganizate în orele de noapte, utilizarea sistemelor pasive de captare a radiației solare etc.) atât reducerea vârfurilor de temperatură interioară, cât și reducerea intervalului de timp în care se depășește valoarea asociată condiției de confort termic.

În cazul în care procedeele pasive se dovedesc insuficiente, se completează soluțiile tehnice menționate cu procedee active care

realizează climatizarea spațiilor ocupate, dar cu un consum suplimentar de energie (termică și / sau electrică) provenind din procesele de generare a frigului (fie prin compresie, fie prin absorbție, fie prin utilizarea unor surse naturale de frig precum pânza de apă freatică) și de vehiculare a agenților de răcire (apă, aer) în instalațiile de climatizare.

- În cazul clădirilor aflate în stadiul de proiect, realizarea, fără consum suplimentar de energie sau cu un consum minim de energie, a parametrilor termodinamici de confort în sezonul estival impune adoptarea unor soluții de arhitectură și de conformare energetică a clădirii care să minimizeze intervenția sistemelor de climatizare. Practic verificarea variației temperaturii sau a entalpiei aerului interior în funcție de destinația clădirii, în ziua senină de vară, se impune ca instrument de decizie atât arhitectural cât și energetic.

Modelul de analiză prezentat în lucrarea de față se deosebește de modelul prezentat în reglementările autohtone și europene, atât structural cât și ca relevanță fenomenologică. Se au în vedere două modele derivate din modelul general de transfer de proprietate.

Primul model (considerat cel mai uzual) se referă la procese de transfer de căldură fără a include variația umidității aerului interior.

Al doilea model include variația umidității aerului interior ca proces semnificativ asociat variației temperaturii aerului. În continuare se prezintă modelele de calcul menționate.

Modelul matematic de evaluare a variației temperaturilor interioare din spațiile ocupate, în lipsa instalațiilor de climatizare

Principalele ipoteze care fundamentează modelul matematic sunt următoarele:

1. Conturul termodinamic al incintelor se împarte în suprafețe adiabatice și în suprafețe prin care se produce transfer de căldură.

- Suprafețele adiabatice sunt adiacente spațiilor cu funcțiuni asemănătoare (ex.

birouri, camere de locuit etc.) care sunt incluse în zona principală a clădirii;

– Suprafețele prin care se produce transfer de căldură sunt adiacente mediului exterior natural și spațiilor care aparțin de zonele secundare ale clădirii;

2. Temperaturile care se analizează reprezintă fie valori medii la nivelul suprafețelor (elemente de anvelopă exterioară, elemente de construcție interioare), fie valori medii volumice prin raportare la întregul volum ocupat de aerul din incintă.

3. Distribuția temperaturii în interiorul elementelor de construcție interioare și al elementelor de contur adiabatice este una uniformă pe grosimea sau în masa elementului de construcție. În funcție de valoarea numărului adimensional Biot (Bi) se introduce o funcție de corecție care departajează din punct de vedere al profilului de temperaturi interioare elementele de construcție ușoare în interiorul cărora distribuția de temperatură este uniformă, de cele masive în care distribuția de temperatură are alură parabolică. Funcția de corecție este o funcție „spline” care are rolul de a transforma profilul parabolic în valoare uniform repartizată în structură fără alterarea fluxului termic pe contur.

4. Transferul de căldură între incintele care fac parte din zona principală și spațiile care fac parte din zona secundară este descris prin ecuațiile specifice regimului staționar de transfer de căldură.

5. Transferul de căldură prin elementele de anvelopă exterioară ale zonelor secundare este descris prin ecuații specifice regimului nestaționar de transfer de căldură (inclusiv transferul de căldură prin sol).

6. Pasul de timp (recomandat) este de 3.600 s, dar în raport cu funcția de repartiție a mărimilor de intrare (parametrii climatici) acest pas de timp poate fi redus.

Ipotezele prezentate sunt acceptabile fizic, fapt demonstrat de experimentările efectuate în incinte reale în sezonul cald. Validarea ipotezelor

este una de tip global prin compararea rezultatelor finale cu variația reală a temperaturilor interioare măsurate [7].

Ecuațiile de bilanț termic vizează:

- Conturul termodinamic al incintei;
- Aerul din interiorul incintei;
- Elementele de construcție interioare.

Ecuațiile de bilanț termic reprezintă bilanțul fluxurilor termice caracteristice elementelor menționate. Din punct de vedere fizic și structural cele trei clase de ecuații realizează un întreg, care se subsumează ecuației generale de tip Kirchhoff-Fourier cu condițiile de unicitate proprii conturului termodinamic și domeniului reprezentat de incintă, cărora li se asociază condiția temporală reprezentată de valori ale parametrilor termodinamici la momentul $t = 0$. Ecuațiile de tipul K – F se bucură de proprietatea de ergodicitate, astfel încât condiția de convergență se îndeplinește prin anularea rapidă a efectului condițiilor inițiale.

• Ecuația de bilanț termic a anvelopei de rezolvă utilizând metoda Răspunsului Termic Unitar (R.T.U.) aplicată structurilor compozite transformate în structuri multistrat [3], [4]. Rezultă primul parametru termodinamic semnificativ, respectiv temperatura medie a suprafeței interioare a anvelopei, adiacentă spațiului ocupat:

$$\bar{\theta}_s(t) = \beta \cdot \theta_i(t) + \theta_e(\tau) \quad (1)$$

în care:

β – coeficient adimensional determinat în funcție de suprafețele de transfer de căldură ale elementelor opace și transparente care compun anvelopa adiacentă mediului exterior natural, de rezistențele termice corectate ale acestora, precum și de valoarea coeficientului global superficial de transfer de căldură, α_i ;

$\theta_i(t)$ – temperatura interioară rezultantă a incintei;

$\theta_e(t)$ – temperatura exterioară de contur a anvelopei rezultată din combinația liniară a temperaturilor echivalente și virtuale ale elementelor de construcție

transparente și opace dotate sau nu cu sisteme de protecție împotriva radiației solare.

• Ecuația de bilanț termic a aerului din incintă include rata de ventilare constantă sau variabilă a incintei precum și componenta convectivă a aporturilor interne de căldură din spațiul analizat.

Rezolvarea ecuației algebrice liniare (în cazul în care rata de ventilare este asigurată prin instalația de ventilare mecanică) conduce la soluția:

$$\theta_a(t) = \delta_1(t) \cdot \bar{\theta}_e(t) + \delta_2(t) \cdot \theta_p(t) + \delta_3(t) \cdot a_{cv}(t) \quad (2)$$

în care:

$\delta_{1,2,3}$ – funcții variabile în timp exprimate în raport cu caracteristicile geometrice ale incintei (volum, suprafață adiacentă mediului exterior natural și suprafața conturului termodinamic), rata de ventilare $n_a(t)$, factorul de formă mediu al incintei $\bar{F}_R$ și coeficientul mediu de transfer de căldură prin convecție naturală în spații deschise, $\bar{\alpha}_{cv}$;

$\bar{\theta}_e(t)$ - temperatura exterioară de referință determinată în funcție de temperatura exterioară de contur și de temperatura aerului exterior $\theta_e(t)$, cu relația:

$$\bar{\theta}_e(t) = \theta_e(t) + \frac{\alpha_{cv} \cdot S_E \cdot (1 + \beta)}{n_a(t) \cdot V \cdot \rho \cdot c_{pa}} \cdot \dot{\theta}_e(t) \quad (3)$$

în care β reprezintă valoarea β corectată cu un coeficient adimensional care sintetizează coeficienții specifici de transfer de căldură ai incintei:

$$\beta = \beta \cdot \frac{\frac{\alpha_r}{\alpha_i} \cdot \bar{F}_R \cdot \left(\frac{S_T}{S_E} - 1 \right)}{1 - \frac{\alpha_r}{\alpha_i} \cdot \bar{F}_R \cdot \beta} \quad (4)$$

Temperatura interioară rezultantă a incintei $\theta_i(t)$ se determină cu o relație complexă, sub forma:

$$\theta_i(t) = C_1(t) \cdot \bar{\theta}_e(t) + C_2 \cdot \dot{\theta}_2(t) +$$

$$+ C_3(t) \cdot \theta_p(t) + C_4(t) \cdot a_{cv}(t) \quad (5)$$

în care $C_1, \dots, C_4$ reprezintă coeficienți numerici cu valoare de pondere a participării temperaturilor și a densității de flux termic convectiv datorat surselor interne de căldură, în constituirea valorii $\theta_i(t)$.

Temperatura $\theta_p(t)$ reprezintă temperatura medie a elementelor de construcție interioare și rezultă din integrarea celei de a treia ecuații din clasa ecuațiilor K – F, respectiv ecuația de bilanț termic a elementelor de construcție interioare.

• Ecuația de bilanț termic a elementelor de construcție interioare are forma generală:

$$Mc \cdot \psi(Bi) \cdot \frac{d\theta_p(t)}{dt} + \sum_{j=1}^n [Sq(t)]_j + \phi_{LR}(t) = 0 \quad (6)$$

în care:

$\phi_{LR}(t)$ – flux termic datorat aporturilor interne de căldură de natură radiantă;
 Mc – capacitatea termică globală a elementelor de construcție interioare
 q_j – flux termic specific caracteristic elementului “j” de anvelopă
 S_j – suprafața elementului “j” de anvelopă.

Ecuația (6) conține funcția de corecție $\psi(Bi)$ care are valoarea unitară pentru $Bi \leq 3$ și valori subunitare pentru $Bi > 3$. Valorile $\psi(Bi) < 1$ semnifică faptul că numai o parte din masa elementelor de construcție interioare (masa activă) participă la modificarea energiei interne a elementelor de construcție interioară.

Ecuația diferențială (6) este o ecuație diferențială ordinară liniară de ordinul 1 neomogenă cu coeficienți variabili. Integrarea se efectuează comod analitic dacă ecuația se scrie sub forma echivalentă:

$$\frac{d\theta_p(t)}{dt} + D_1(t) \cdot \theta_p(t) = D_2(t) \quad (7)$$

a cărei soluție are forma:

$$\theta_p(t = \Delta t) = [\theta_p(t = 0) + A_1] \cdot \exp(-A_2 \Delta t) + A_3 \Delta t + A_4 \quad (8)$$

în care:

Δt – pasul de integrare (se recomandă $\Delta t = 3.600$ s);

$A_1, \dots, A_4$ – coeficienți numerici generați la fiecare pas de integrare.

Cunoașterea variantei $\theta_p(t)$ prin valori discrete obținute la pasul de timp Δt permite determinarea variației celorlalte temperaturi semnificative ale spațiilor ocupate, $\theta_a(t)$ și $\theta_i(t)$ conform relațiilor (2) și (5). Se compară $\theta_i(t)$ cu valoarea considerată ca fiind proprie stării de confort termic θ_{i_0} și rezultă durata în care $\theta_i(t) \geq \theta_{i_0}$, precum și valoarea maximă $\theta_{i_{\max}}$ a temperaturii interioare rezultante.

În cazul în care rata de ventilare este rezultatul procesului de aerisire a spațiilor ocupate (ventilare naturală neorganizată), rata de ventilare $n_a(t)$ depinde de diferența de temperatură dintre $\theta_a(t)$ și $\theta_e(t)$. Relația de calcul determinată pe baza analizei teoretice și experimentale a ratei de ventilare dintre spații puse în contact convectiv se determină cu relația [8]:

$$n_a(t) = 50,86 \cdot [\theta_a(t) - \theta_e(t)]^{0,32} \cdot \frac{S_F}{V} + n_{a_0}(t) \quad (9)$$

în care:

$n_a(t)$ – rata de ventilare [h^{-1}];

S_F – aria deschiderii ferestrelor/ușilor.

Pentru intervalul de timp în care nu se aerisește spațiul ocupat, rata de ventilare se menține la o valoare constantă cerută de condițiile minime de confort fiziologic (în cazul în care spațiul este ocupat), respectiv $n_{a_0} = 0,4 \text{ h}^{-1}$ sau la valoarea asigurată ca urmare a gradului de etanșeitate propriu rosturilor mobile ale ferestrelor/ușilor (în cazul în care spațiul este ocupat).

În cazul aerisirii spațiilor, determinarea $\theta_i(t)$ se face pe baza aceluiași model matematic adaptat caracteristicii de dependență neliniară între rata de ventilare și temperatura $\theta_a(t)$. Rezolvarea se bazează pe ecuațiile (2) și (6) utilizând o procedură rapid convergentă de calcul

iterativ pentru fiecare moment t . Calculul se consideră încheiat la iterația “ i ” pentru care se îndeplinește condiția:

$$|\theta_{a_i}(t) - \theta_{a_{i-1}}(t)| \leq \varepsilon \quad (10)$$

în care $\varepsilon \approx 0,01$.

Modelul matematic a fost adaptat pentru calculul tabelar astfel încât beneficiază de facilitățile de calcul și reprezentare oferite de programul EXCEL sau de oricare alt program similar.

Modelul matematic pentru evaluarea stării de confort din spațiile ocupate în care se produc degajări

semnificative de vaporii de apă

Ecuațiilor care fac parte din clasa K – F li se adaugă ecuația de bilanț de masă (concentrație) bazată pe cunoașterea debitului de vaporii de apă care se degajă în spațiul ocupat:

$$V_{\rho_u} \frac{dX(t)}{dt} + n_a \cdot V \cdot \rho_u [X(t) - X_e] - g \cdot N_{\text{pers}} = 0 \quad (11)$$

în care:

V – volumul de aer [m^3];

ρ_u – densitatea aerului uscat [kg/m^3];

g – debitul de vaporii de apă degajați în încălț [kg/pers.s];

X – umiditatea absolută a aerului interior [kg/kg usc];

X_e – umiditatea absolută a aerului exterior [kg/kg usc];

N_{pers} – numărul de persoane.

Principalele ipoteze aplicabile ecuației (11) sunt următoarele:

- densitatea de flux termic provenită din surse interioare nu variază în raport cu temperatura și cu umiditatea aerului;

- densitatea aerului uscat ρ_u nu variază în raport cu temperatura (aerul se consideră fluid incompresibil);

- umiditatea absolută a aerului exterior și rata de ventilare “ n_a ” se consideră invariabile pe durata de analiză ($\Delta t \approx 3600$ s).

În condițiile respectării ipotezelor formulate, soluția particulară a ecuației (11) este:

$$X(t) = X_0 \cdot \exp(-n_a t) + \left(\frac{g \cdot N_{pers}}{n_a \cdot V \cdot \rho} + X_e \right) \cdot [1 - \exp(-n_a t)] \quad (12)$$

în care soluția este valabilă pentru $t \in [0, \Delta t]$ și X_0 reprezintă umiditatea absolută la începutul

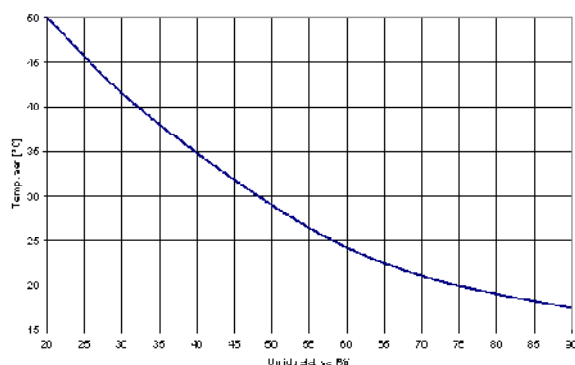


Figura 1. Corelarea dintre temperatura aerului și umiditatea relativă în spații ocupate – Lancaster, Carstens, Ruge

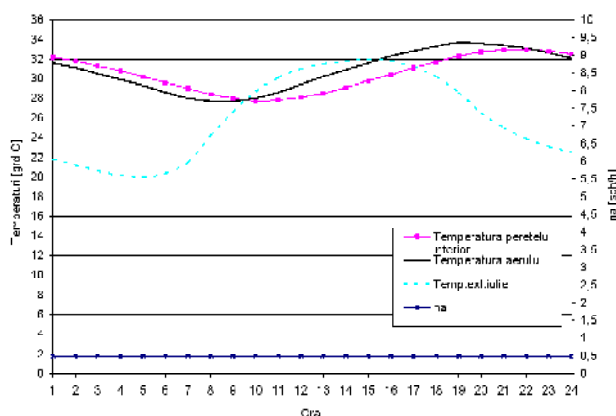


Figura 2. Temperaturi specifice climatului interior în condițiile utilizării neraționale

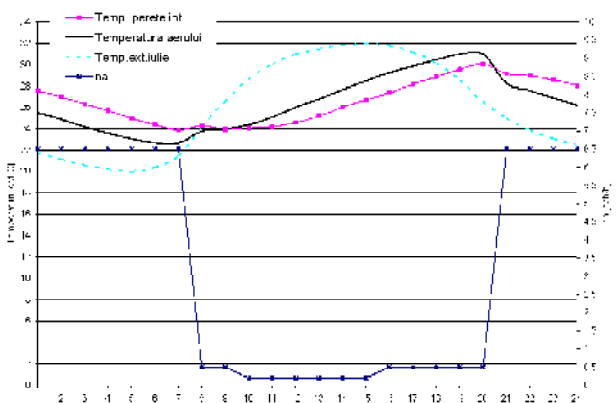


Figura 3. Temperaturi specifice climatului interior în condițiile utilizării raționale

intervalului de integrare. Rezultă astfel funcția $X(t)$ valabilă pe durata zilei de calcul.

Față de cazul anterior în care procesul analizat este de tipul încălzire la $X = \text{ct.}$, în care simultan cu creșterea temperaturii aerului $\theta_a(t)$ se produce și reducerea umidității relative a aerului, în cazul degajărilor importante de vapori de apă, starea aerului implică atât încălzire cât și creștere a umidității absolute. Diagrama Lancaster – Carstens – Ruge stabilește granița dintre confort și disconfort prin corelarea limită $\theta_a = f(\varphi)$ în care φ este umiditatea relativă a aerului în mediu liniștit (fig. 1).

Mulțimea punctelor $D(\theta_a, \varphi)$ situate deasupra curbei atestă stare de disconfort în spațiul ocupat.

Studiu de caz privind aplicarea modelului matematic de evaluare a variației parametrilor termodinamici ai unei incinte nedotate cu sistem de climatizare

Se consideră o incintă delimitată de mediul exterior natural de doi pereți și de terasă. Pereții sunt orientați către VEST și SUD și sunt caracterizați de punți termice liniare. Peretele orientat spre VEST este în întregime opac și are aria suprafeței de transfer de căldură de 10,8 m². Peretele orientat SUD are inclusă o fereastră (liberă sau dotată cu oblon exterior reflectorizant) cu suprafața de 2,7 m². Partea opacă are suprafața de 8,1 m². Aria terasei este de 16 m².

Planșeul despărțitor este confecționat din beton armat cu grosimea de 0,10 m iar pereții verticali adiabatici sunt confecționați din B.C.A. de 0,12 m. Coeficientul de absorbție al radiației solare are valorile $\alpha_1 = 0,60 / \alpha_2 = 0,20$. Parametrii climatici sunt specifici lunii iulie, zi senină pentru gradul de asigurare de 95%. Aporturile de căldură internă au valorile $a_1 = 10 \text{ W/m}^2 / a_2 = 4 \text{ W/m}^2$. În interior nu se produc degajări semnificative de vapori de apă. Temperatura interioară de confort are valoarea $\theta_{i0} = 26^\circ\text{C}$. S-au analizat trei strategii de ventilare a spațiului. Rezultatele se prezintă în graficele din figurile 2, 3 și 4.

Se constată că față de cazul prezentat în graficul din fig. 2 care atestă instalarea disconfortului pronunțat pe întreaga durată a zilei, strategia de ventilare nocturnă intensă combinată cu reducerea fluxului termic datorat surselor interne conduc la reducerea disconfortului la cca. 12 h (fig. 3). Intervențiile asupra anvelopei specifice cazului prezentat în fig. 4 (dotarea ferestrei cu oblon mobil cu acoperire reflectorizantă, termoizolarea terasei și dotarea cu acoperire reflectorizantă) reduc starea de disconfort (acceptabil) la numai 2,5 h. Rezultă ca măsuri de reorganizare a activității și soluțiile pasive pot elimina disconfortul termic fără consum de energie și în condiții de deplină suportabilitate.

Model matematic de evaluare a necesarului de frig în cazul utilizării sistemelor de climatizare

Modelul matematic este reflectat prin ecuațiile menționate anterior care se modifică prin limitarea superioară a temperaturii interioare rezultante la valoarea considerată de confort θ_{i0} . Rezolvarea ecuației implică o decizie generată de intervalele de timp în care se admite variație naturală a temperaturii interioare (orele de aerisire nocturnă) și orele în care se urmărește menținerea valorii setate θ_{i0} prin funcționarea sistemului de climatizare. Ecuațiile de bilanț termic nu fac departajarea sezonieră, ca mod de

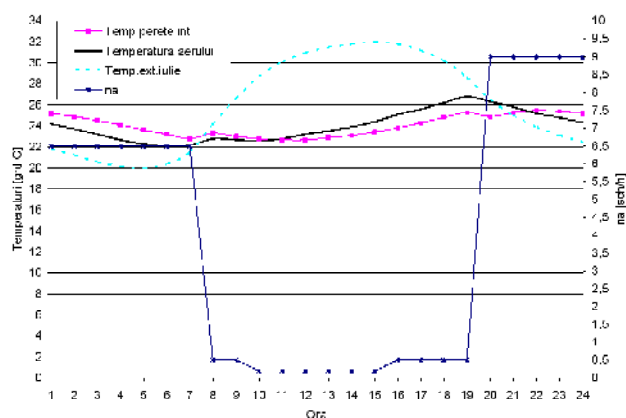


Figura 4. Temperaturi specifice climatului interior în condițiile utilizării raționale corelate cu intervenții asupra anvelopei

rezolvare fiind identic aplicabile pe toată durata anului climatic reprezentativ. Se pun în evidență atât intervalele de timp în care se mențin temperaturile interioare de confort setate (diferite pentru sezonul de încălzire de cele proprii sezonului estival), cât și intervalele de timp în care $\theta_i(t)$ evoluează liber între limite impuse domeniului său de variație (în sezonul cald până la valoarea setată a temperaturii de gardă, în sezonul de tranziție între valorile setate ale sezoanelor rece și cald și în sezonul cald între aceleași valori în perioadele de ventilare naturală sau artificială a spațiilor care coincid cu orele de noapte sau cu zilele ale căror temperaturi exterioare nu impun climatizarea spațiilor).

Schema logică de principiu este reprezentată în figura 5. Complexitatea modelului decizional face imposibilă prezentarea schemei logice detaliate de programare.

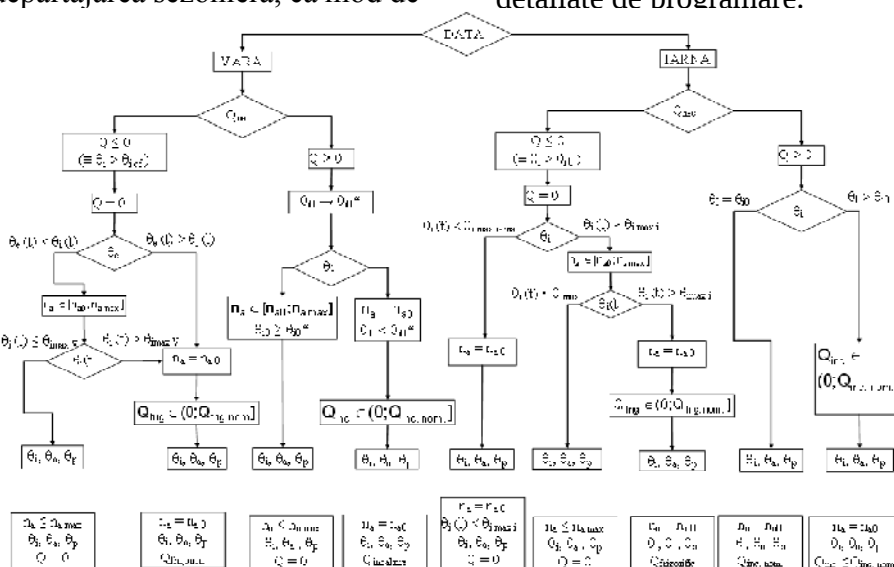


Figura 5. Schema logică de principiu a modelului de calcul

Variația temporală a parametrilor intensivi $\theta_i(t)$ și $\theta_a(t)$, precum și a parametrului extensiv $Q_{climatizare}(t)$ permite studierea detaliată a comportamentului probabil al unei clădiri ocupate precum și a Performanței Energetice a acesteia prin prisma valorilor specifice integrale sezoniere q_{INC} [kWh/m²sez] și q_{RAC} [kWh/m²sez] și a valorii anuale de necesar energetic, q [kWh/m²an]. Spre deosebire de metodele de calcul standardizate sau incluse în reglementările autohtone, metoda care implică utilizarea modelului matematic prezentat, nu necesită definirea intervalelor de timp în care se utilizează distinct sau suprapus cele două funcții de încălzire/răcire a spațiilor. Totodată sunt evitate erorile care sunt generate de aplicarea standardelor europene, preluate ca standarde naționale SR EN 13790, SR EN 13791 și SR EN 13792, prin utilizarea unor modele de calcul grosiere și simpliste. Se utilizează un model matematic realist, validat experimental și conform cu realitatea fenomenologică proprie proceselor de transfer de proprietate din spațiile ocupate.

Studiu de caz privind analiza comportamentului unui spațiu ocupat în anul climatic reprezentativ

Este analizată o structură constructivă reprezentativă pentru clădirile de tip condominiu, având caracteristicile elementelor de închidere prezentate în tabelul 1.

Calculul este realizat în două variante de vitrare:

- suprafața vitrată și suprafața opacă corespunzătoare clădirii convenționale de calcul – Structura A (structura de bază);
- toată suprafața anvelopei verticale realizată din elemente de construcție vitrate,

cu geam și tâmplărie de calitate foarte bună ($R_{vitraj} = 0,7 \text{ m}^2\text{K/W}$, corespunzător unei tâmplării fără punți termice, cu trei foi de geam, tratate low-e) – Structura D.

Analiza vizează într-o primă etapă întreaga clădire, determinându-se fluxul termic necesar în scopul menținerii spațiilor interioare la temperatura de confort în cazul climatizării clădirii. Pentru realizarea simulării este utilizată o climă reală, reprezentativă pentru zonele din nordul țării.

Se poate observa din figura 6 că pe durata sezonului cald, temperaturile relativ scăzute din timpul nopții permit în cazul structurii A menținerea unui microclimat interior de confort practic fără utilizarea instalațiilor de condiționare / răcire a aerului. Situația se schimbă în cazul clădirii cu anvelopa verticală vitrată (structura D), care are un necesar de energie în scopul răcirii mult mai mare. Totuși, este evident că nici în cazul structurii D nu se poate pune problema existenței unui interval continuu de răcire, comportamentul termotehnic al clădirii demonstrând o succesiune a intervalelor de necesar de frig care alternează cu perioade în care ventilarea mecanică asigură menținerea unei temperaturi interioare de confort. Caracteristicile necesarului de frig prezentate demonstrează inconsistența metodelor de tip „grade-zile” utilizate pentru determinarea necesarului frigorific, aceste metode neavând suport fizic.

Este interesant de urmărit gradul de corelare al necesarului de căldură / frig al celor două structuri cu temperatura exterioară – figurile 8, 9. Gradul redus de corelare ($0,66 \div 0,79$) pune în evidență incorectitudinea utilizării regimului staționar de căldură pentru determinarea necesarului de căldură / frig al clădirilor.

Tabelul 1.

Caracteristicile constructive ale clădirii analizate

Element de construcție		Rezistența termică m ² K/W
Tip	Descriere	
Perete exterior	Zidărie din cărămidă plină 37,5 cm, cu planșee din beton armat	0,58
Fereastră exterioară	Dublă, fără etanșare specială	0,31
Terasă	Placă beton armat 14 cm + 25 cm zgură expandată	1,11
Planșeu peste subsol	Placă beton armat cu pardoseala mozaic sau linoleum	0,38
Perete către casa scării	Zidărie cărămidă plină 25 cm	0,56

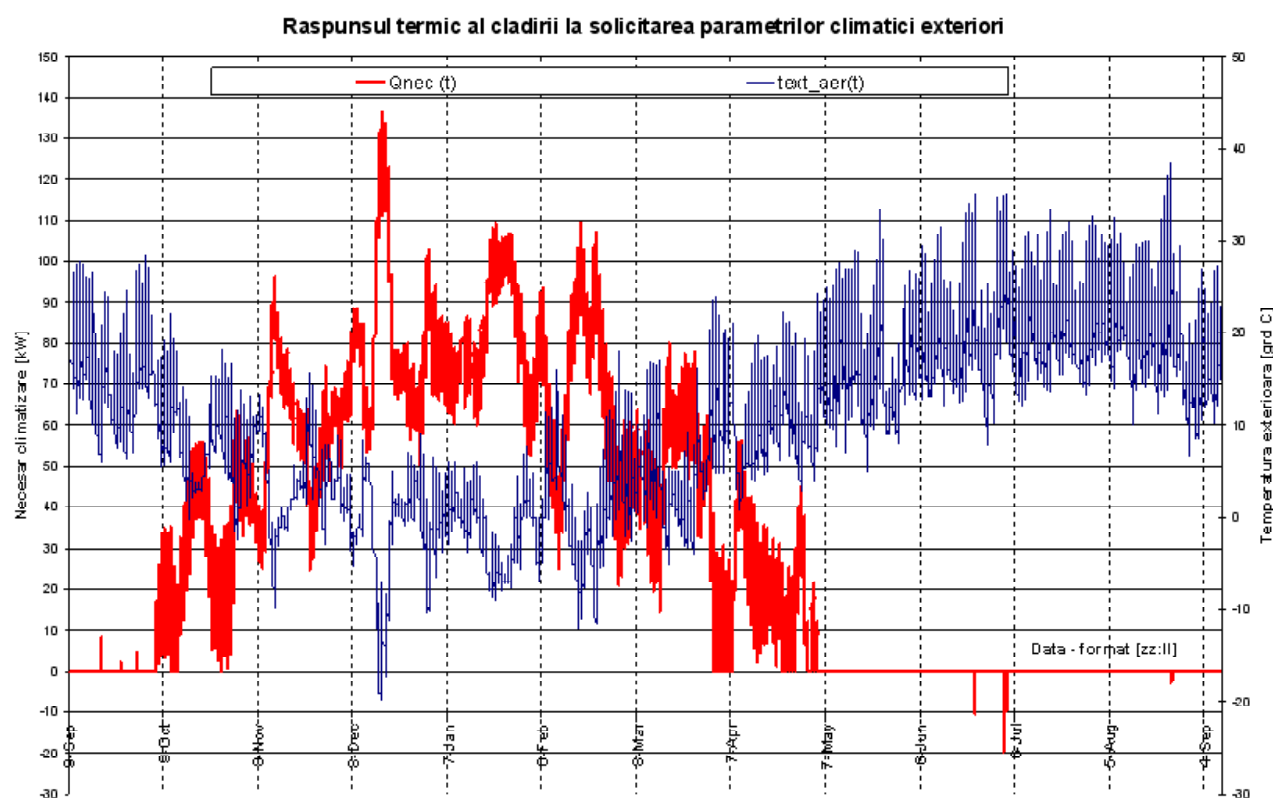


Figura 6. Necesarul de flux termic pentru climatizare în funcție de temperatura exterioară– structura A

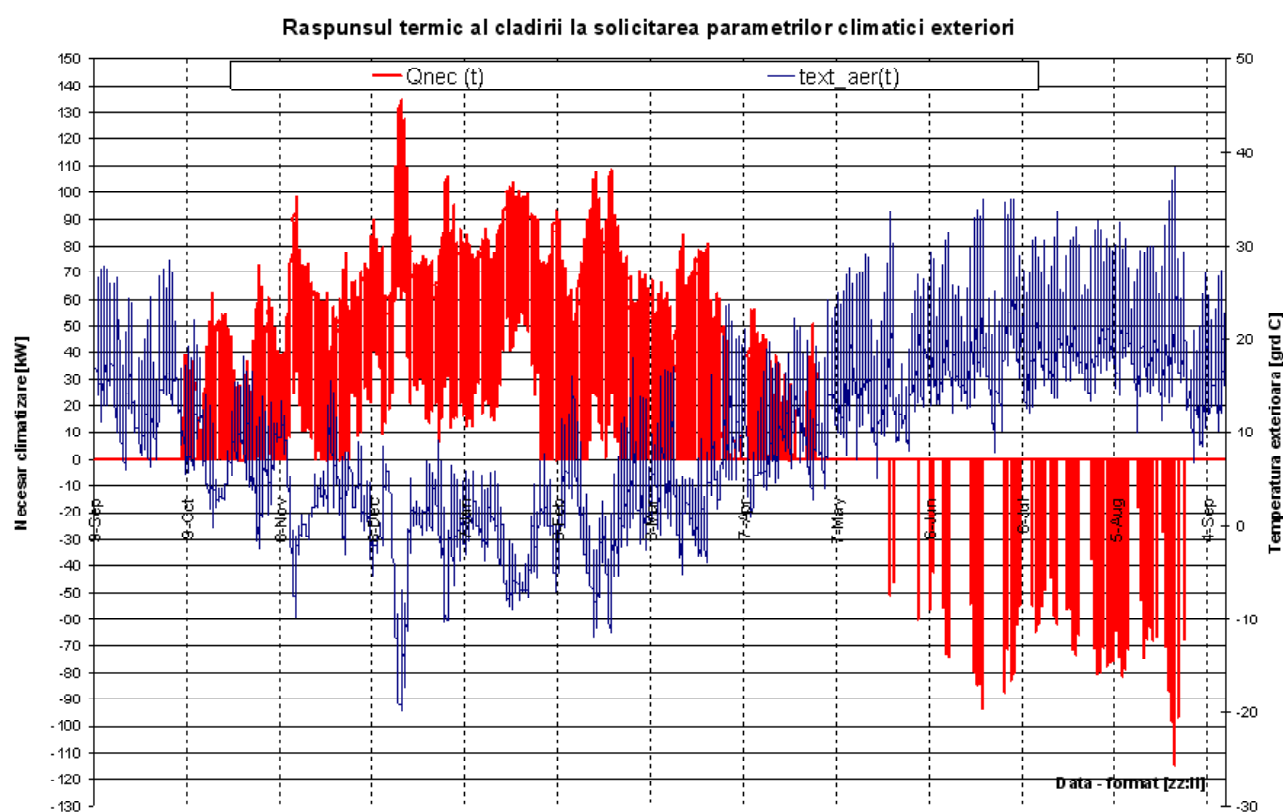


Figura 7. Necesarul de flux termic pentru climatizare în funcție de temperatura exterioară– structura D

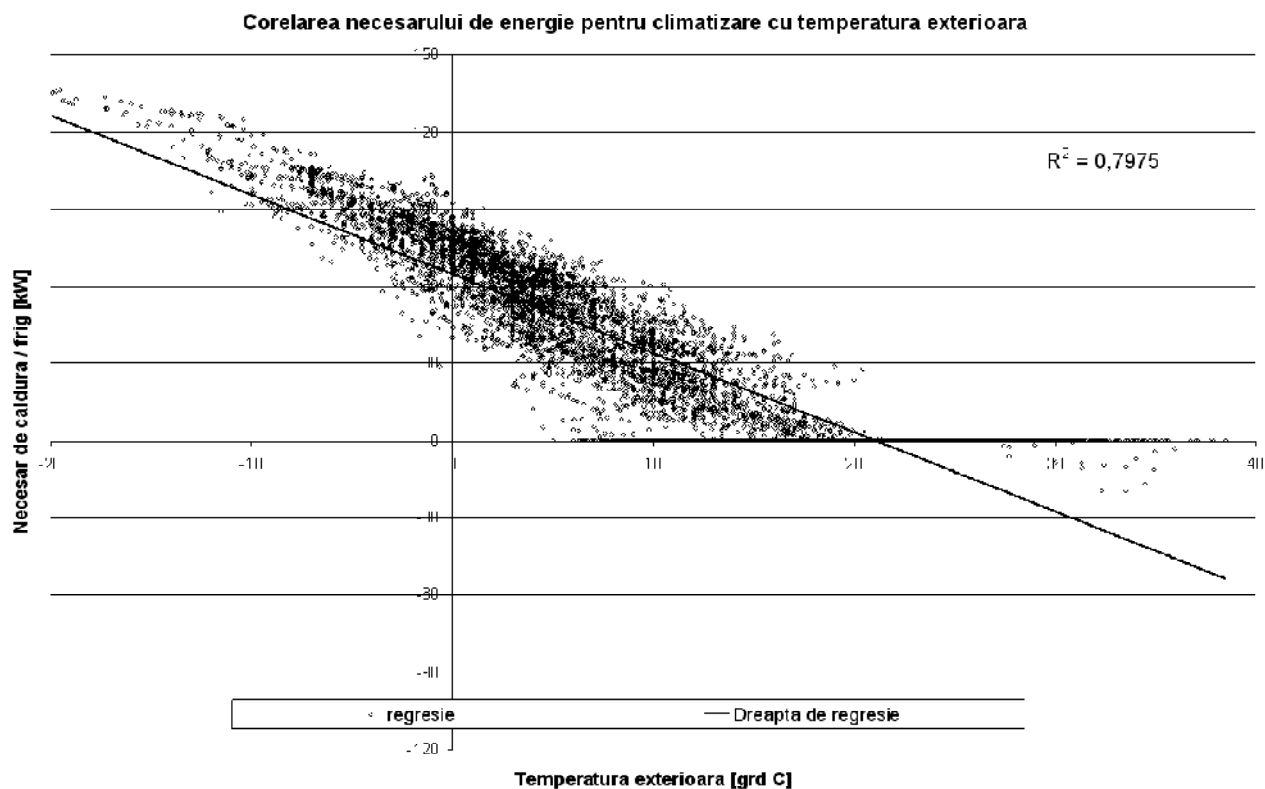


Figura 8. Corelarea necesarului de energie pentru climatizare cu temperatura exterioară – structura A

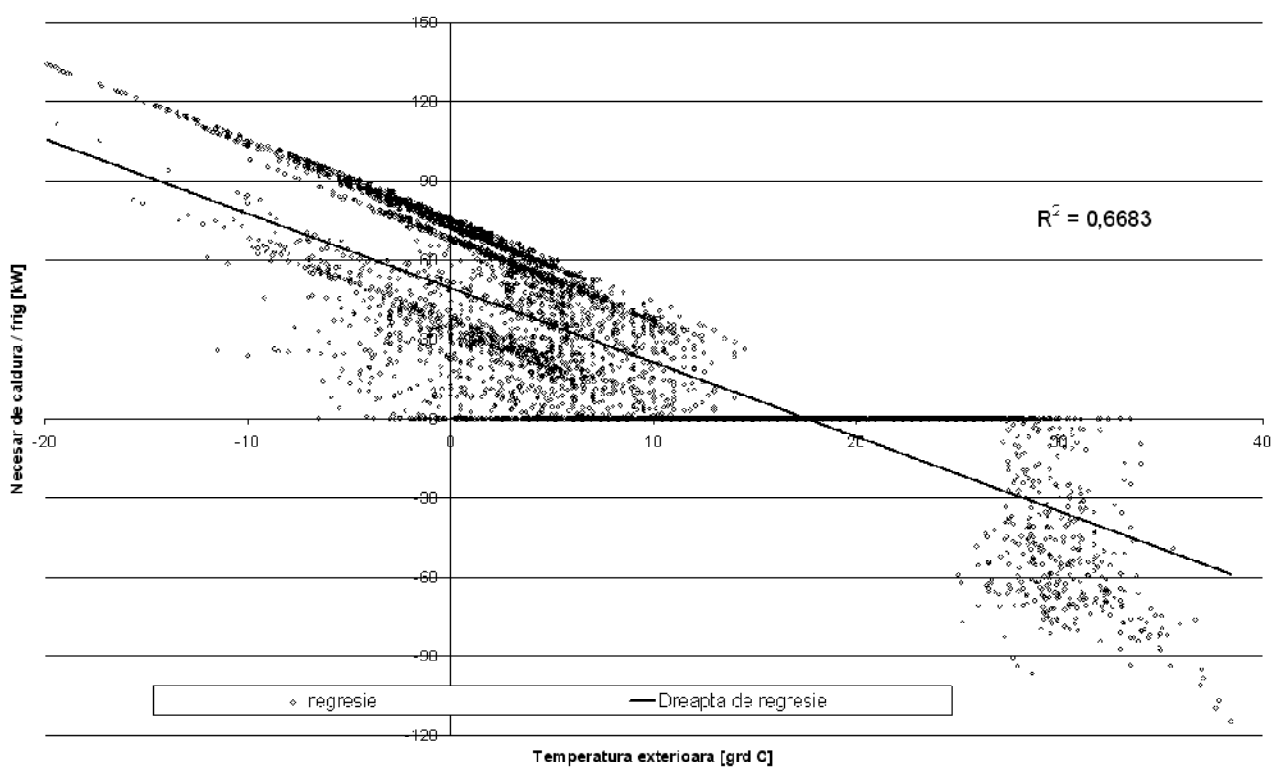


Figura 9. Corelarea necesarului de energie pentru climatizare cu temperatura exterioară – structura D

O importanță deosebită pentru asigurarea unui microclimat interior în parametri de confort cu un consum minim de energie o are și modul de ventilare al spațiilor analizate. În figurile 10 și 11 se prezintă temperaturile caracteristice spațiilor interioare – temperatura interioară, temperatura aerului și temperatura pereților (temperatura elementelor interioare de stocaj termic) pentru cele două structuri analizate. Sunt utilizate două regimuri de ventilare:

- ventilarea cu număr constant de schimburi de aer n_{a0} , corespunzător

numărului minim de schimburi de aer necesar din punct de vedere fiziologic;

- ventilarea rațională, cu număr variabil de schimburi de aer, între n_{a0} și un număr maxim de schimburi de aer, rezultat din condiții de confort și condiții tehnologice.

Se observă diferențele semnificative, de aproximativ $2 \div 4$ grade, dintre temperaturile caracteristice microclimatului interior în cele două cazuri de ventilare, pe durata lunii Iulie.

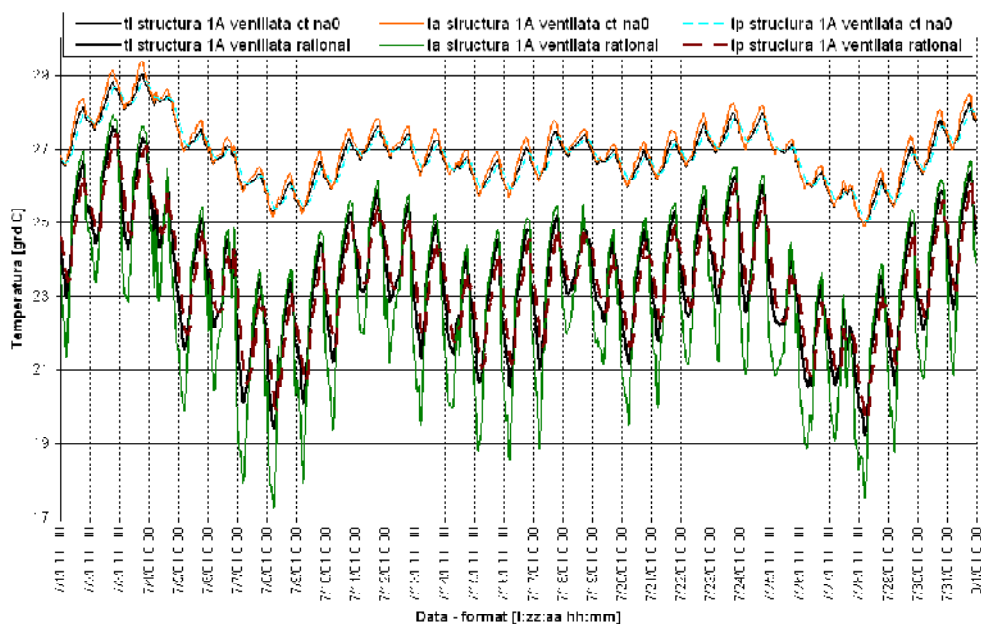


Figura 10. Temperaturi interioare relevante – structura A

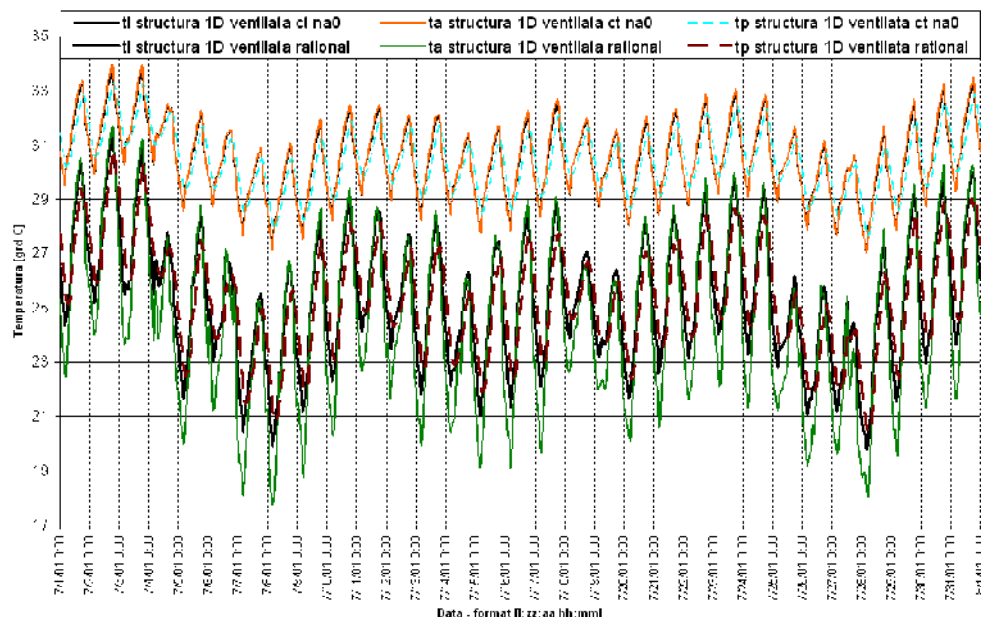


Figura 11. Temperaturi interioare relevante – structura D

Diferențe semnificative dintre temperaturile asociate microclimatului interior se înregistrează (a se vedea figurile 12, 13) și în cazul utilizării climei medii STAS 6648/82, corespunzătoare orașului București, pentru un grad de asigurare de 98%, corelate cu intensitatea radiației solare corespunzătoare zilei senine de Iulie.

În figurile 14 și 15 se poate observa și necesarul de frig în scopul menținerii spațiilor interioare la temperatura de confort, mult diferit pentru cele două tipuri de structuri.

În continuare este analizat cazul unui apartament mediu uzual (cu suprafața utilă de 60 m²), a căror geometrie este obținută pe baza configurației clădirii de referință [9]. Apartamentul se consideră, succesiv, amplasat la parter și la ultimul etaj, în clădirea uzuală (structura A) și în clădirea cu anvelopă verticală complet vitrată (structura D). Apartamentul se consideră climatizat, temperatura interioară de confort fiind considerată 27°C.

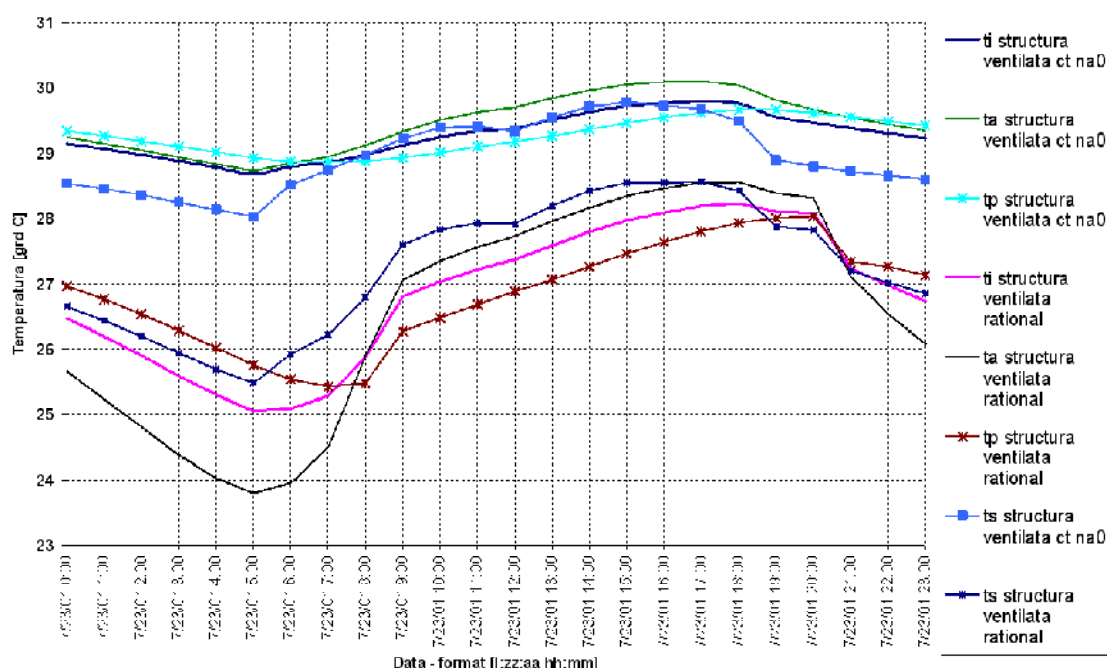


Figura 12. Temperaturi interioare relevante – structura A

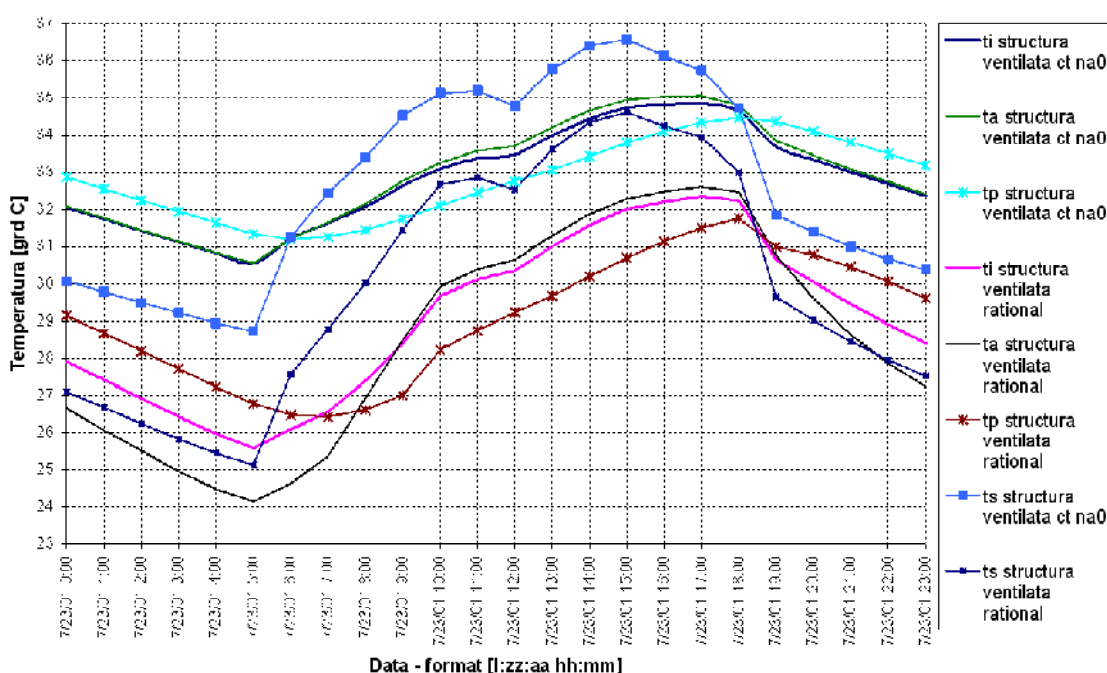


Figura 13. Temperaturi interioare relevante – structura D

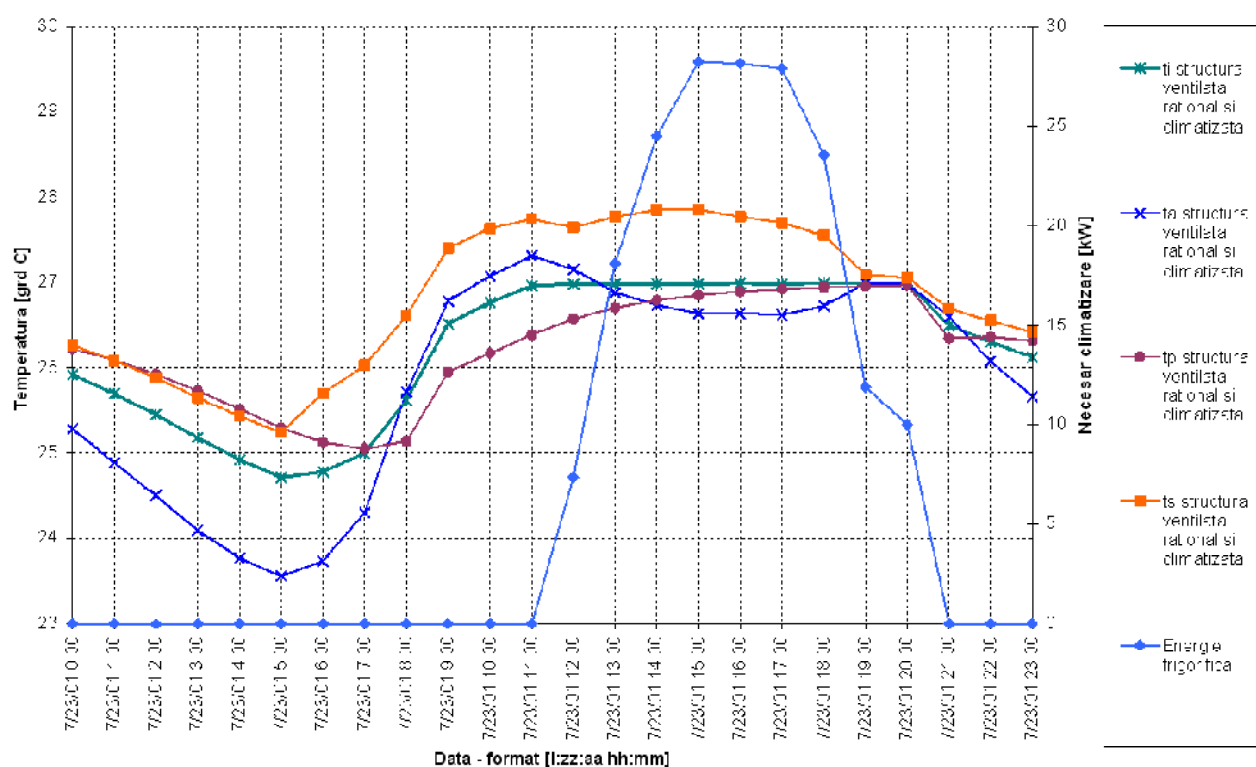


Figura 14. Temperaturi interioare relevante și necesarul de frig pentru climatizare – structura A

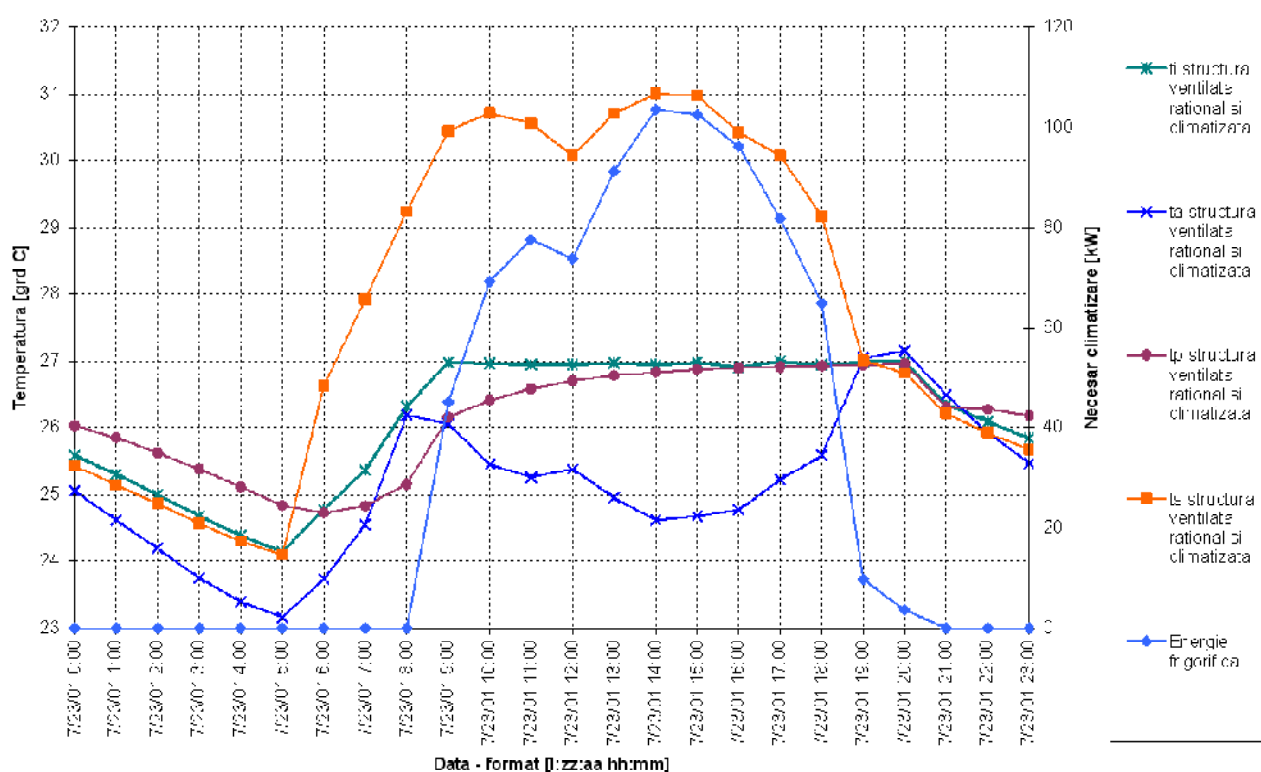


Figura 15. Temperaturi interioare relevante și necesarul de frig pentru climatizare – structura D

În figura 16 se observă că pentru structura uzuală ventilarea rațională a spațiului și efectul de masă termică a solului permit menținerea unei temperaturi de confort termic și nu este necesară intervenția instalației de răcire. Ventilarea mecanică cu un număr mare de schimburi de aer permite menținerea temperaturii spațiului interior la temperatura de confort pe durata dimineții. Ulterior, când temperatura aerului exterior

depășește valoarea temperaturii aerului din incinta analizată, numărul de schimburi de aer se reduce până la numărul minim fiziologic necesar. Degajările interne de căldură, aporturile exterioare datorate ventilării și aporturile prin anvelopă sunt preluate de elementele masive interioare. În cazul structurii D, aceleași condiții nu îi pot asigura însă independența de instalația de răcire – figura 17.

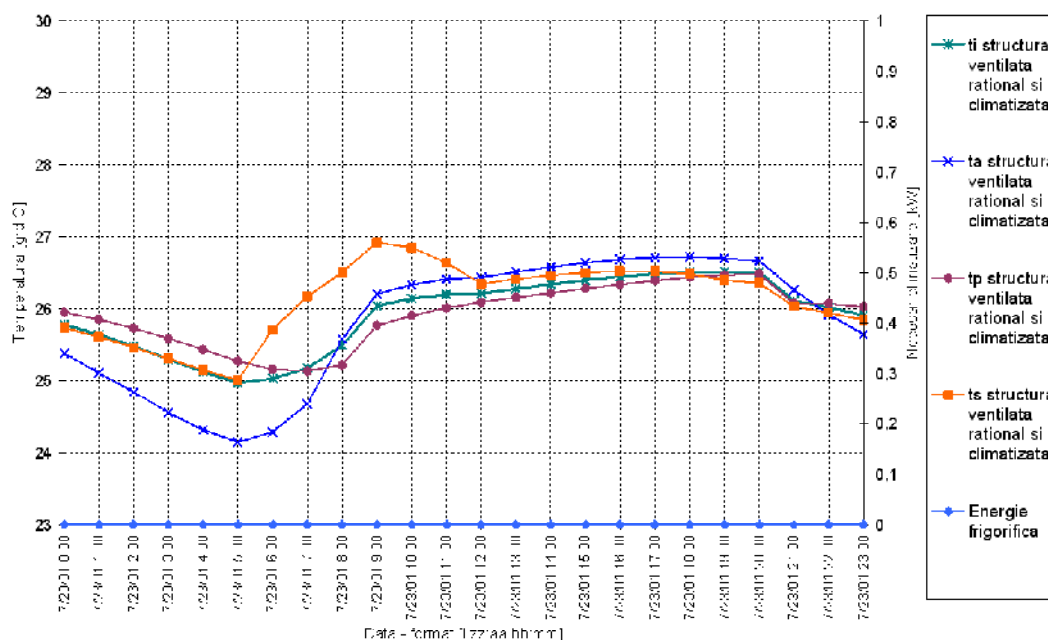


Figura 16. Temperaturi interioare relevante și necesarul de frig pentru climatizare – structura A, apartament amplasat la parter, expunere Est

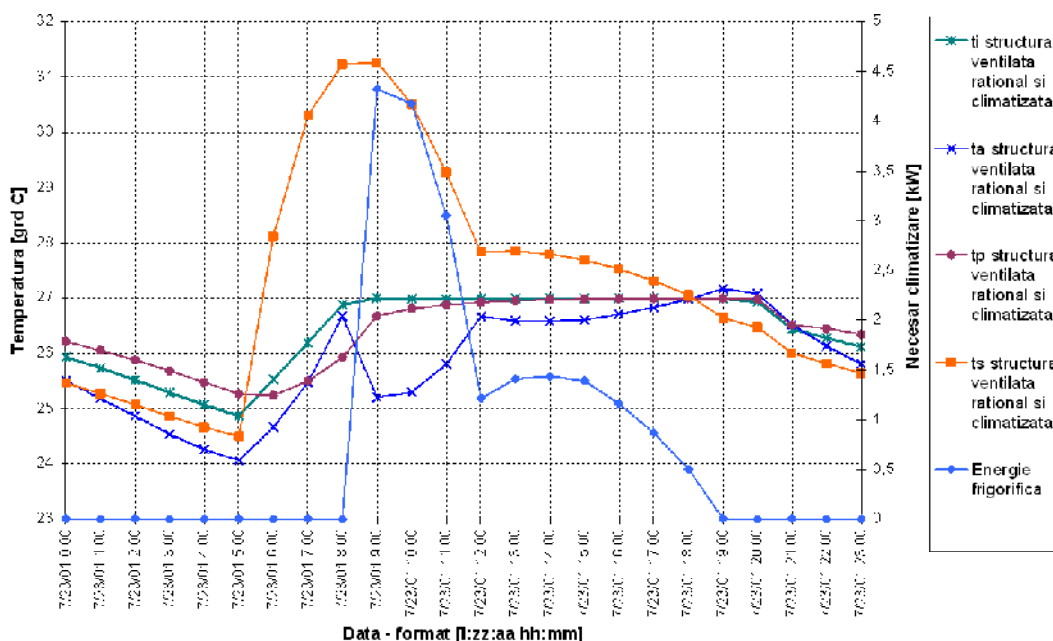


Figura 17. Temperaturi interioare relevante și necesarul de frig pentru climatizare – structura D, apartament amplasat la parter, expunere Est

Se observă că în cazul structurii D, radiația solară recepționată datorită vitrajului generos conduce la un aport termic care nu poate fi anulat prin ventilarea mecanică a spațiului și necesită intervenția instalației de climatizare, în special în primele ore ale zilei când aporturile solare directe sunt foarte importante datorită expunerii spre est.

Același tip de apartament, amplasat de data aceasta la ultimul etaj al clădirii, este caracterizat de necesar de răcire în ambele tipuri de structuri. Aceasta este însă mult mai mare, atât ca amplitudine cât și ca energie, în cazul structurii D (figurile 18, 19). Vârful de sarcină este de 2,5 kW (8600 BTU/h) pentru structura A în timp ce pentru structura D vârful atinge 8 kW (27400 BTU/h), fiind practic imposibil de

asigurat cu instalații de climatizare uzuale de tip split. O altă problemă, mai importantă decât modul de asigurare al acestui necesar de frig, îl constituie temperatura ridicată a mediilor radiante. Aceasta conduce la necesitatea unei temperaturi foarte reduse a aerului din interiorul incintei, în vederea obținerii temperaturii interioare necesare. După cum se poate observa din figura 19, în intervalul orar 15-17 este necesară o temperatură a aerului de maxim 21°C pentru ca temperatura interioară rezultantă să fie de 27°C. Această temperatură scăzută conduce pe termen lung la probleme de sănătate ale persoanelor care utilizează acest spațiu, dar poate cauza și efecte imediate, prin socul termic resimțit în cazul schimbărilor bruște de temperatura.

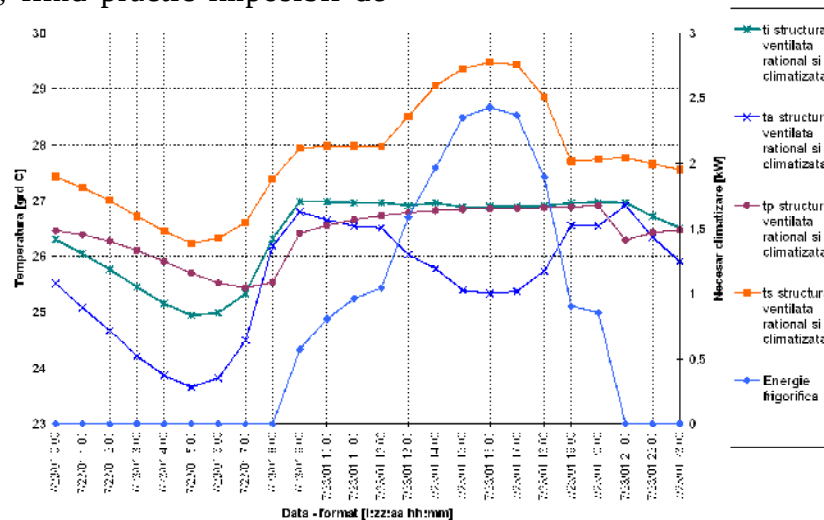


Figura 18. Temperaturi interioare relevante și necesarul de frig pentru climatizare – structura A, apartament amplasat la ultimul etaj, expunere Vest

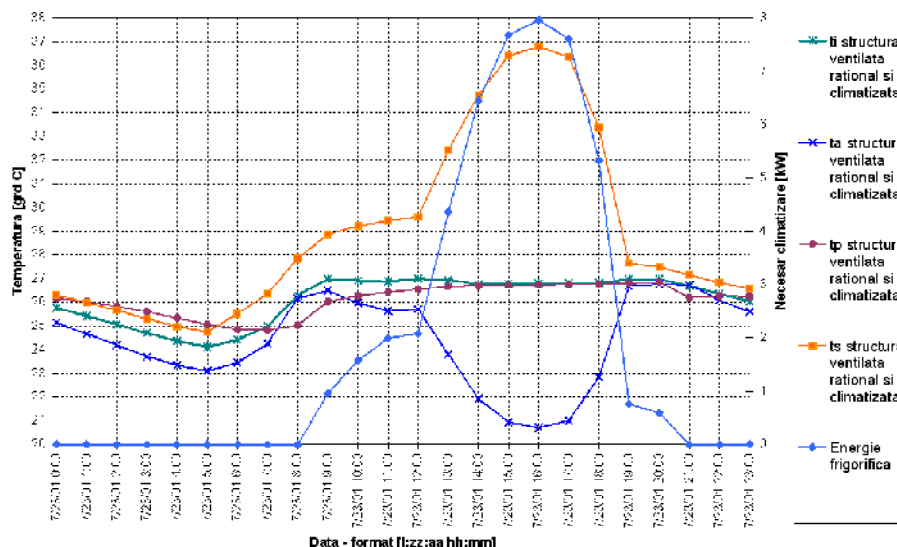


Figura 19. Temperaturi interioare relevante și necesarul de frig pentru climatizare – structura D, apartament amplasat la ultimul etaj, expunere Vest

Concluzii

Modelul matematic prezentat vizează evaluarea stării clădirilor existente și în stadiu de proiect, acoperind gama de analize termotehnice referitoare la microclimatul spațiilor interioare. Metodele de calcul elaborate sunt aplicabile în scopul determinării profilului temperaturilor spațiilor analizate, în vederea stabilirii necesarului de frig (flux termic) în regim sensibil, a necesarului de frig în cazul considerării umidității, a necesarului de căldură, a necesarului de energie orară / zilnică / lunară / sezonieră / anuală în vederea climatizării spațiilor.

Pot fi cuantificate calitativ și cantitativ efectele reabilitării termice a clădirilor și al modificării modului de utilizare a clădirii, succesiunea etapelor fiind următoarea:

- introducerea datelor referitoare la clădire și la condițiile amplasamentului;
- analiza profilului temperaturilor pe perioada anotimpului călduros și verificarea condițiilor de confort;
- în cazul în care temperatura rezultată depășește valoarea de confort termic, efectul unor măsuri de reabilitare care pot conduce în mod pasiv (izolarea termică, aplicarea de straturi reflectorizante, modificarea orarului de funcționare a etc.) sau activ (ventilare mecanică controlată) la reducerea aporturilor de căldură și la eliminarea degajărilor interne de căldură;
- în cazul în care măsurile analizate nu permit atingerea confortului termic, dimensionarea instalației de climatizare.

Modelul matematic prezentat stă la baza unui program de calcul care este în curs de finalizare și validare pe suportul experimental constituit de modelele la scară naturală ale INCERC.

Rezultatele simulării atestă următoarele aspecte ale comportamentului termodinamic al clădirilor:

- la nivelul unui sezon / an de analiză, necesarul de energie pentru climatizare este de tip intermitent, analizele de tip „grade-zile” fiind fără suport fizic și departe de fenomenul real;

- masivitatea elementelor interioare de construcție asociată cu ventilarea nocturnă poate asigura, în cazul unui vitraj moderat, o temperatură cu $2 \div 4$ grade mai scăzută în incintele analizate;

- deși rezistența medie a clădirii cu anvelopa verticală vitrată în totalitate (structura D) este mai mare decât cea a clădirii obișnuit (structura A), necesarul de energie frigorifică al acesteia este mai mare. În plus, configurația acestor clădiri permite cele mai puține opțiuni în vederea îmbunătățirii din punct de vedere termic, iar pentru asigurarea unei temperaturi interioare de confort trebuie utilizată o temperatură a aerului foarte redusă.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Constantinescu, D., Petran, H.; Petcu, C. – *Validarea Numerică și Experimentală a Metodei de Calcul a Performanței Energetice a Clădirilor* (PEC), Conf. Internațională Sinaia, 2007
- [2] Hamburger, L., – *Introducere în teoria Propagării Căldurii; Conducția prin solide*; Ed. Academiei RPR, 1956
- [3] Constantinescu, D. – *Realizarea unei clădiri cu consum redus de căldură*. Contr. INCERC 12/1971, SCI 2/1970
- [4] *** *Dimensiuni europene ale metodelor de evaluare a performanțelor energetice ale clădirilor noi și existente*; Proiect Program Nucleu INCERC PN 06 11 03 01 – 2006
- [5] Constantinescu, D. ș.a – *Assessment of the Optimal Energy Functional Solution for an Intelligent Apartment Building* – Proc. TIEES Trabzon., 1996
- [6] Constantinescu, D. ș.a – *The Virtual Outdoor Temperature – a Thermodynamic Parameter Specific to the Apartment Buildings*, Clima 2000 Liège, 1997
- [7] *** *Fundamentarea fenomenologică a activității de identificare a caracteristicilor clădirilor existente*; Contr. INCERC 512/2001
- [8] *** *Optimizarea consumurilor de energie pentru încălzire în clădirile de locuit individuale*; Contr. INCERC 461/1991
- [9] *** *Cercetări privind impactul introducerii noilor produse, echipamente precum și a soluțiilor tehnice moderne de proiectare și exploatare asupra instalațiilor de încălzire centrală și de producere a apei calde din ansamblurile de locuințe racordate la sistemul de termoficare*, Contr. INCERC nr. A.133/1996