

## STUDY ON BUILDING ENERGY EFFICIENCY USING NUMERICAL SIMULATIONS AND IN SITU MEASUREMENTS

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la  
Universitatea Politehnica Timișoara  
în domeniul de doctorat Inginerie Civilă și Instalații

**autor ing. Cristina-Mariana TĂNASĂ**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Valeriu Augustin STOIAN

Iulie 2018

### Abstract

Sectorul clădirilor este cel mai mare consumator de energie, fiind responsabil pentru mai mult de o treime din consumul total de energie la nivel global și implicit o sursă importantă de emisii de dioxid de carbon. Acest sector fost identificat ca având un potențial major de eficientizare energetică și reprezintă un punct cheie în atingerea obiectivelor de combatere a schimbărilor climatice. La nivelul Uniunii Europene a fost introdus conceptul de clădire cu consum de energie aproape zero, ca standard de eficiență energetică pentru clădiri. În acest context, studiile privind eficiența energetică prin măsurători și simulări numerice pot duce la validarea și îmbunătățirea soluțiilor tehnice pentru atingerea obiectivelor de clădiri cu consum de energie aproape zero. Directiva republicată privind Performanța Energetică a Clădirilor definește metodologia costului optim, prin care soluțiile de eficiență energetică sunt corelate cu aspectele economice, în vederea identificării costului global cel mai scăzut. Această lucrare de doctorat prezintă studii bazate pe monitorizarea unei clădiri pilot eficientă energetic. Rezultatele procesului de monitorizare au permis determinarea consumului real de energie al clădirii pe categorii de consumatori și analiza parametrilor climatului interior (temperatura, umiditate relativă a aerului, concentrație CO<sub>2</sub>). O parte din datele colectate de sistemul de monitorizare au fost prelucrate și implementate într-un model de calcul energetic al clădirii în vederea realizării unei simulări numerice cu pas orar care reflectă condițiile reale de utilizare a clădirii (temperatura, iluminat, date climatice etc.). Rezultatele simulărilor numerice arată diferențe foarte mici față măsurători. Astfel, în baza unui model de calcul calibrat, au fost făcute studii parametrice în vederea optimizării consumului de energie și a temperaturii interioare. Ultima parte a tezei este bazată pe aplicarea metodologiei costului optim, pentru care au fost propuse 19 pachete de măsuri pentru anvelopa clădirii și sistemele tehnice, inclusiv sisteme de producere a energiei din surse regenerabile. Acest ultim studiu are ca scop identificare acelor soluții care conduc la atingerea performanței de clădire cu consum de energie aproape zero și totodată, identificare soluțiilor de cost optim.

### Rezumatul capitolelor tezei

#### 1. Introducere

Acest capitolul prezintă cadrul de referință al tematicii tezei, motivația și obiectivele cercetării.

##### *1.1. Aspecte generale legate de consumul de energie*

Atât în Uniunea Europeană (UE) cât și la nivel mondial, sectorul clădirilor consumă cea mai mare parte (40%) din consumul total de energie, fiind astfel responsabil pentru o cantitate semnificativă de emisii de gaze cu efect de seră. Îmbunătățirea eficienței energetice a clădirilor

este crucială pentru atingerea obiectivelor UE de reducere a emisiilor de gaze cu efect de seră cu 80-95% până în 2050, comparativ cu 1990 [1]. Directiva 2010/31 / CE introduce conceptul de "clădire cu consum de energie aproape zero" (nZEB), care are un consum de energie neregenerabilă aproape zero și un nivel foarte scăzut de emisii de CO<sub>2</sub>. Directiva privind performanța energetică a clădirilor (EPBD) republicata definește nZEB ca fiind "o clădire cu o performanță energetică foarte ridicată [...]. Necesarul de energie aproape de zero sau foarte scăzut ar trebui acoperit într-o măsură semnificativă de energie din surse regenerabile, inclusiv energia din surse regenerabile produsă la fața locului sau în apropiere"[2].

### 1.2. Research motivation and objectives

Principala provocare în atingerea obiectivelor stabilite de Directiva privind performanța energetică a clădirilor constă în furnizarea unor soluții extrem de eficiente din punct de vedere energetic, care sunt în același timp rentabile. Pentru a oferi soluții fiabile și eficiente proprietarilor de clădiri, sunt necesare studii experimentale și teoretice care investighează răspunsul acestor clădiri.

Obiectivele principale ale acestei teze pot fi rezumate în următoarele:

- Prelucrarea și analiza datelor de monitorizare ale clădirii eficiente energetic investigate;
- Implementarea datelor din monitorizare în modelul de calcul energetic al clădirii pentru a realiza o simulare calibrată.
- Validarea rezultatelor teoretice ale simulărilor numerice în raport cu datele măsurate în ceea ce privește consumul de energie și temperatura aerului interior.
- Investigații utilizând simulări numerice ale modificărilor parametrilor de utilizare a clădirii care ar putea mări sau micșora consumul de energie al clădirilor;
- Investigarea mai multor scenarii de eficiență energetică aplicate clădirii studiului de caz cu scopul de a identifica acele soluții care conduc la realizarea nZEB și, în același timp, identificarea soluțiilor de cost optim.

### 1.3. Overview of the thesis

Acest sub-capitol rezuma conținutul tezei, prezentând pe scurt ideea de bază a fiecărui capitol. Teza de doctorat este structurată pe șapte capitole și patru anexe, într-un număr total de 195 de pagini.

## **2. Metoda cercetării**

Acest capitol definește principalele concepte utilizate în cercetare efectuată în această lucrare de doctorat, din perspectiva studiilor și cercetărilor existente în domeniu.

### 2.1. Concepte de clădiri eficiente energetic

Cercetările din această teză fac referire la mai multe concepte de clădiri eficiente energetic. Conceptul casei pasive este astăzi cel mai bine cunoscut concept de clădire eficientă din punct de vedere energetic, cu numeroase implementări la nivel mondial. Principiile casei pasive vizează reducerea la minimum a pierderilor de căldură și optimizarea aporturilor de căldură intern, astfel încât necesarul de energie pentru încălzire să nu depășească 15 kWh/m<sup>2</sup>y. În timp ce standardul casei pasive oferă principii de proiectare detaliate, nZEB este definit numai prin intermediul indicatorilor numerici pentru energia primară din raportul dintre energia neregenerabilă și energia regenerabilă și nu sunt furnizate indicații privind modul de realizare a acestui standard. Studiile efectuate de Institutul pentru Casa Pasivă susțin că standardul de casă pasivă, care este astăzi un standard de construcție binecunoscut, poate fi o bază pentru atingerea țintei nZEB [4].

### 2.2. Energia primară

Conversia energiei finale (gaz natural, electricitate, lemn etc.) în energie primară se face prin intermediul factorilor de conversie, care indică cantitatea de energie primară utilizată pentru obținerea unei unități de energie finală. Caracterizarea clădirii cu consum de energie aproape zero se face în termeni de energie primară, prin intermediul a doi indicatori: consum specific

de energie primară din surse neregenerabile și procent de energie regenerabilă din consumul total de energie primară. În conformitate cu definiția tehnică a nZEB prezentată de Kurnitski [5], indicatorul de energie primară se calculează pe baza sumei totale a energiei importate și exportate (calculată folosind factori de energie primară la nivel național) și a suprafeței utile. Procentul de energie regenerabilă este determinată pe baza consumului total de energie primară. Consumul total de energie primară se calculează pe baza întregului consum de energie al clădirii, incluzând energia termică solară, energia electrică din panouri fotovoltaice și / sau vânt, energia regenerabilă din pompele de căldură etc.

### 2.3. Metode în modelele de calcul energetic al clădirilor

La momentul actual, modelarea și calculul energetic al clădirilor sunt utilizate pe tot parcursul ciclului de viață al unei clădiri, în mod special pentru optimizare [6], [7]. Mai mult, prin utilizare datelor din sisteme de monitorizare (consum de energie, temperatura interioară, aporturi interne, parametri climatici etc.), se pot obține modele de calcul calibrate. Există o mulțime de incertitudini și variabile care interacționează și care pot afecta acuratețea rezultatelor de simulare într-un model de calcul energetic al unei clădiri. Utilizarea simulărilor numerice și modelelor de calcul energetic în faza de utilizare a clădirii, permit verificarea simulărilor prin compararea parametrilor mășurați cu cei simulați și totodată optimizarea performanței energetice [8]. În prezent există mai multe instrumente de calcul al performanțelor energetice a clădirilor care au niveluri diferite de complexitate și capabilități. Cele mai frecvente și utilizate pe scară largă sunt Energy Plus [9] și TRNSYS [10]. În această teză, a fost utilizat programul EnergyPlus, care este un instrument de modelare energetică a clădirilor și efectuează calcule cu pas orar.

### 2.4. Sisteme de monitorizare a clădirilor

Implementarea unui sistem de monitorizare într-o clădire reprezintă o modalitate de evaluare a performanțelor reale ale unei clădiri, un aspect important care trebuie luat în considerare atunci când sunt utilizate soluții tehnice noi și sunt așteptate performanțe energetice ridicate. Tabelul 1 conține pașii relevanți care trebuie parcurși în procesul de monitorizare a clădirilor.

Table 1 – Pași relevanți în procesul de monitorizare a clădirilor [11]

Protocol de măsurare și verificare	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Colectarea datelor privind clădirea</li> <li>2. Stabilirea limitelor monitorizării</li> <li>3. Parametri și date relevante</li> <li>4. Frecvența și durata monitorizării</li> <li>5. Senzori adecvați și sistem de achiziție a datelor</li> <li>6. Planificarea și instalarea echipamentului de monitorizare</li> <li>7. Definirea și punerea în aplicare a procesului de prelucrare a datelor</li> </ol>
------------------------------------	---

### 2.5. Eficiența energetică și analiza economică

Directiva 2010/31/UE [2] a introdus noțiunea de "cost optim" pentru a fi luată în vedere atunci când sunt concepute soluțiile tehnice pentru clădirilor cu consum de energie aproape zero. Nivelul de cost-optim este definit ca fiind nivelul de performanță energetică care duce la costul global cel mai scăzut. Costul global este determinat luând în considerare costurile investiției inițiale, costuri de mentenanță, costuri de înlocuire și costuri cu energia. Metodologia costului optim este definită în conformitate cu Directiva privind performanța energetică a clădirilor și a Regulamentului Delegat nr. 244/2012 [3].

## **3. Clădirea studiu de caz**

### 3.1. Informații generale

Cercetarea din această teză are ca obiect al studiului o clădire rezidențială eficientă din punct de vedere energetic, care este în uz și monitorizată continuu de câțiva ani. Clădirea investigată face parte dintr-un duplex, construit în apropierea orașului Timișoara, România. Premisa acestui proiect a fost construirea unei case după principiile de proiectare a casei pasive și utilizarea

materialelor și tehnologiilor specifice construcțiilor rezidențiale din zonă.

### 3.2. Concept de proiectare

Clădirea a fost proiectată de către studioul de arhitectură SDAC din Timișoara, iar echipa de proiectare a fost condusă de un arhitect care a urmat cursurile de designer de case pasive, organizate la Institutul de Case Pasive din Darmstadt. Prin urmare, s-a acordat o atenție deosebită detaliilor arhitecturale și structurale pentru a obține o anvelopă termică eficientă și un control strict al schimburilor de aer între mediul interior și exterior.

### 3.3. Arhitectură, sistem structural și anvelopă

Din punct de vedere arhitectural, clădirea investigată este o clădire cu două etaje, cu formă dreptunghiulară în plan și volum prismatic. Sistemul structural constă în blocuri de fundație din beton legate de grinzi de fundare, pereți structurali de zidărie cu stâlpișori și centuri din beton armat și planșee cu grinzi de lemn. Elementele anvelopei sunt foarte bine izolate cu plăci din polistiren și vată minerală, având valori ale transmitanței termice sub  $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### 3.4. Sistemul de instalații

Casa are un sistem complex care asigură încălzire, ventilație, răcire și apă caldă menajeră. Componentele cheie ale sistemului sunt sistemul de ventilare mecanică cu recuperare a căldurii și un schimbător de căldură subteran pentru preîncălzirea/pre-răcirea aerului proaspăt. Pentru încălzire/răcire este utilizată o pompa de căldură aer-apă cu ciclu reversibil iar pentru apa caldă menajeră colector solar cu tuburi vidate. Casa este echipată cu un boiler de apă caldă și un cazan pentru stocarea energiei termice. Căldura este distribuită în încăperi prin convectoare instalate în tavan. Casa este electrică în întregime, toate echipamentele folosesc energia electrică din rețea.

### 3.5. Faza de construcție a clădirii

Construcția casei a fost atent gestionată pentru a asigura calitatea sistemului de izolație termică, reducând la minimum punțile termice și asigurând etanșeitarea construcției.

## **4. Monitorizarea clădirii: procesarea și analiza datelor din monitorizare**

Acest capitol prezintă sistemul de monitorizare al clădirii studiate, strategia de prelucrare și analiză a datelor.

### 4.1. Sistemul de monitorizare

Sistemul de monitorizare este alcătuit dintr-o unitate centrală și mai multe contoare de energie și senzori. Structura și componentele sistemului de monitorizare provin din categoriile de parametri care au fost propuși a fi monitorizați: parametri aerului interior și calitatea aerului interior, parametrii mediului exterior, consumul de energie al clădirii, parametrii instalațiilor și echipamentelor. Fiecare componentă de măsurare are un ID unic. Datele înregistrate sunt stocate pe un server și pot fi descărcate ca fișiere Excel pentru fiecare lună. Procesul de monitorizare este disponibil online la <http://www.sdac.ro/site/archives/796>.

### 4.2. Procesarea datelor din monitorizare

Procesul de monitorizare a fost inițiat la sfârșitul anului 2011. Sistemul înregistrează valori la fiecare minut și le stochează pe un server. Fișierele de date pot fi descărcate de pe server ca fișiere de foi de calcul pentru fiecare lună. Fiecare fișier lunar conține aproximativ 44000 de linii de valori pentru fiecare componentă de măsurare. Prelucrarea datelor de monitorizare a fost efectuată utilizând Microsoft Excel. Un set de date din 2015 a fost utilizat în această cercetare. Primul pas în procesarea datelor în detectarea și eliminarea erorilor. Ulterior, datele au fost procesate la valori orare, lunare și anuale.

### 4.3. Analiza datelor din monitorizare

În această secțiune sunt analizate rezultatele procesului de monitorizare pentru o serie de parametri: temperatura aerului interior, umiditatea relativă a aerului, concentrația de  $\text{CO}_2$  și consumul de energie.



## 5. Simularea modelului energetic al clădirii

### 5.1. Descrierea instrumentului de calcul utilizate EnergyPlus

EnergyPlus este un program de de calcul utilizat pentru modelarea energetică a clădirilor și care se utilizează pentru a determina consumul de energie în clădiri (încălzire, răcire, ventilație, iluminat, utilizare a apei calde), utilizând un pas de calcul orar. Publicul țintă al software-ului sunt inginerii proiectanți sau arhitecții care doresc să dimensioneze echipamentele clădirii (HVAC), să efectueze studii de reabilitare energetică a clădirilor, să optimizeze performanța energetică, să efectueze studii parametrice și să investigheze diferite scenarii de funcționare a clădirilor sau diferite măsuri de eficiență energetică [ 13].

### 5.2. Crearea modelului de calcul energetic al clădirii

Acest subcapitol urmează procesul de creare a modelului de energie al clădirii. Metodologia este prezentată în Figura 1.

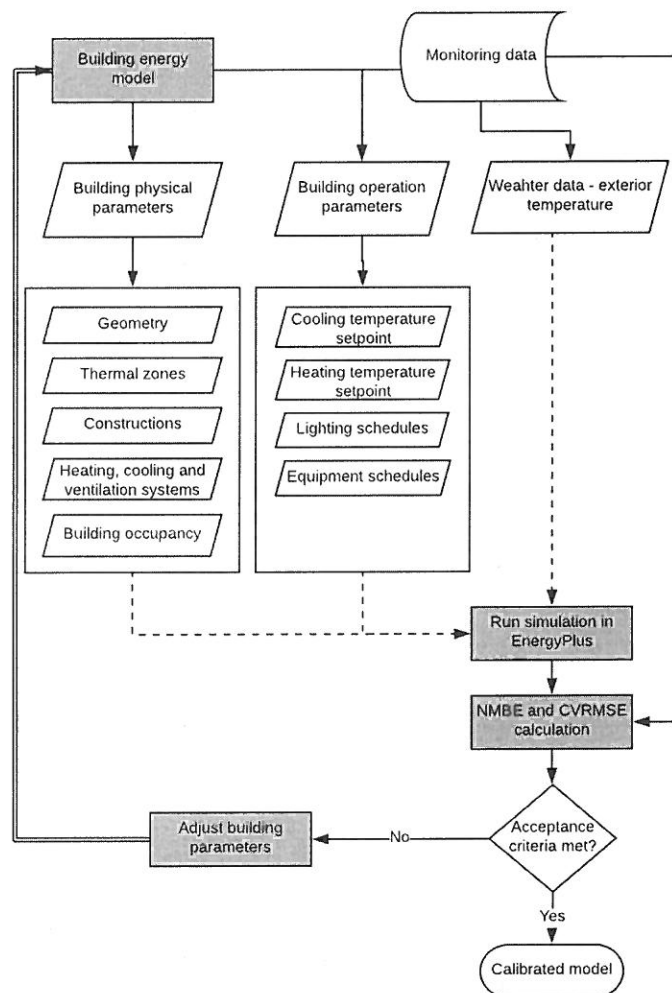


Figure 1 – Metodologia de modelare si calibrare

Scopul modelării a fost de a dezvolta un model de calcul energetic al clădirii folosind condiții reale de funcționare, obținând astfel o simulare calibrată. Geometria clădirii a fost definită în baza planurilor finale ale proiectului. Pentru materialele de construcții utilizate au fost folosite caracteristici uzuale pentru fiecare tip de material. Caracteristicile echipamentelor și instalațiilor clădirii au fost definite pe baza fișelor tehnice furnizate de producătorii echipamentului. Următorii parametri măsurați au fost implementați în modelul de calcul: temperatura interioară ca valoare de termostat pentru încălzire și răcire, temperatură exterioară orară pentru date climatice, rata de infiltrație măsurată, consumul de energie electrică pentru iluminat și

echipamente casnice pentru aporturi interne. Un set de date din 2015 a fost utilizat pentru calibrare. Datele climatice au fost definite în baza unui fișier existent cu date climatice tipice pentru timișoara, în care au fost introduse date măsurate pentru temperatura exterioară, umiditatea aerului și viteza vântului. De asemenea, temperaturile orare ale aerului proaspăt, măsurate după trecerea prin schimbătorul de căldură sol-aer au fost definite ca noduri de aer pentru sistemul de ventilație mecanică. Ulterior rulării simulării modelului de calcul al clădirii, a fost efectuată o verificare a indicilor statistici: eroare normalizată medie (NMBE) și coeficientul de variație al abaterii medii pătratice (CVRMSE).

### 5.3. Rezultatele simulării numerice și comparație cu datele măsurate

Consumul total anual de energie măsurat al clădirii în anul 2015 a fost de 5713.4 kWh, iar modelul de calcul al clădirii a estimat o valoare de 5776.7 kWh, rezultând că simularea a supra-estimat consumul total de energie al clădirii cu 1.11%. Rezultatele prezentate în Tabelul 2 arată că valorile NMBE și CVRMSE pentru valori lunare se încadrează în limita acceptate de calibrare recomandate de Ghidul ASHRAE [12].

Table 2 – Valorile indicilor NMBE and CVRMSE pentru consumul de energie

Categorie	NMBE*	CVRMSE**
Consum total de energie	-1.107 %	3.843 %
Încălzire, răcire, ventilare și apă caldă menajeră	-1.376 %	5.054 %
Iluminat	0.487 %	1.234 %
Echipeamente casnice	-0.327 %	1.385 %

\*NMBE limită acceptată  $\leq \pm 5\%$  [12]

\*\*CVRMSE limită acceptată  $\leq +15\%$  [12]

A fost evaluată și precizia modelului de calcul în estimare temperaturii aerului interior. Valorile NMBE și CVRMSE calculate pentru valori orare sunt -0.82%, respectiv 5.72% și se încadrează în limitele acceptate de calibrare ( $\pm 10\%$ ,  $30\%$ ). Pe tot parcursul anului, temperaturile măsurate ale aerului interior sunt mai mici cu o valoare medie de  $0.20^{\circ}\text{C}$ .

### 5.4. Temperatura interioară și consumul de energie

Pentru acest studiu de caz, a fost studiat impactul temperaturii de încălzire asupra consumului de energie. Utilizând modelul de calcul calibrat, s-au efectuat alte 4 scenarii de simulare utilizând temperatură mai scăzută ( $-1^{\circ}\text{C}$  și  $-2^{\circ}\text{C}$ ) și mai ridicată ( $+1^{\circ}\text{C}$  și  $+2^{\circ}\text{C}$ ) pentru încălzire. Consumul de energie pentru încălzire poate scădea cu 8% și cu 17.3% pentru valorile inferioare ale temperaturii de încălzire cu  $1^{\circ}\text{C}$ , respectiv  $2^{\circ}\text{C}$  și poate crește cu 13.7% și 23.2% pentru valori mai mari ale temperaturii de încălzire cu  $1^{\circ}\text{C}$ , respectiv  $2^{\circ}\text{C}$ . Rezultatele acestei cercetări evidențiază sensibilitatea consumului total de energie al unei clădiri la valoarea setată a temperaturii de încălzire.

### 5.5. Simulare considerând dispozitive de umbrire pentru ferestre

Analiza temperaturii aerului din timpul verii, simulată și măsurată, arată că, de câteva ori, clădirea s-a confruntat cu supraîncălzirea. Astfel, a fost realizată o simulare în care au fost implementate jaluzelele exterioare pentru ferestre în modelul de calcul al clădirii. Sistemele de umbrire propuse constau în jaluzelele exterioare cu lamelele orizontale. Rezultatele simulării arată că în această situație cele mai frecvente valori ale temperaturii sunt sub  $27^{\circ}\text{C}$  (Mai-Septembrie). Pentru cealaltă situație, cele mai frecvente valori ale temperaturii interioare sunt peste  $26^{\circ}\text{C}$ .

## 6. Clădiri cu consum de energie aproape zero: analiza costului optim

### 6.1. Introducere

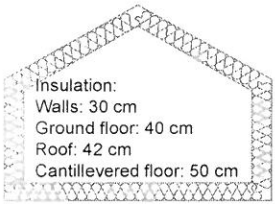
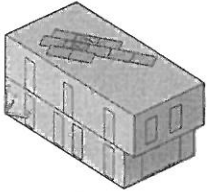

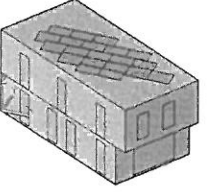

Autoritățile române au stabilit o definiție pentru clădirea cu consum de energie aproape zero, specificând energia primară maximă admisibilă pentru diferite categorii de clădiri, în funcție de zonele climatice ale României. Clădirea investigată în această teză este situată în zona climatică

II. Astfel, pentru toate clădirile rezidențiale noi situate în zona climatică II, energia primară maximă admisibilă din surse convenționale este de 111 kWh/m<sup>2</sup>an, pentru a fi considerată nZEB [14]. De asemenea, s-a decis că energia din surse regenerabile trebuie să acopere cel puțin 10% din energia primară totală. Acest capitol investighează mai multe scenarii de eficiență energetică aplicate clădirii studiu de caz, având ca scop atingerea țintei nZEB, precum și determinarea soluțiilor optime din punct de vedere al costurilor.

### 6.2. Scenarii de eficiență energetică

Scenariile de eficiență energetică propuse sunt fie îmbunătățiri care pot fi implementate în clădirea existentă, fie diferite alte configurații de anvelopă și sisteme tehnice, inclusiv sisteme de producție de energie regenerabilă la fața locului. Pentru a evidenția performanța energetică și economică a soluțiilor propuse, evaluarea este efectuată în comparație cu clădirea de referință care are aceleași caracteristici geometrice, volumetrie și elemente de anvelopă, dar respectă cerințele minime în România în termeni de eficiență energetică. Scenariile propuse pentru anvelopă, sisteme tehnice și producția de energie din surse regenerabile sunt enumerate în Tabelul 3. Anvelopa denumită PH este cea a clădirii reale iar sistemul tehnic I de asemenea. Ca și sisteme de energie din surse regenerabile, au fost propuse 3 configurații de panouri fotovoltaice de diferite puteri. Pachetele de eficiență energetică care vor fi aplicate clădirii studiului de caz sunt combinații între măsurile propuse în Tabelul 3. O măsură suplimentară care este nu sunt enumerate constă în sistemele de umbrire (S). Au fost investigate un număr total de 19 pachete de eficiență energetică, incluzând clădirea de referință și clădirea reală. Numele pachetelor includ: denumire măsură anvelopă\_denumire sistem tehnic\_umbriri + putere sistem panouri.

Tabel 3 – Măsuri propuse

Anvelopa clădirii	Sisteme tehnice	Sisteme energie surse regenerabile
<p><b>PH</b></p> 	<p><b>I</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pompă de căldură aer-apă</li> <li>- Captator solar</li> <li>- Sistem de ventilare mecanică cu recuperare de căldură</li> </ul>	<p>2.4 kW</p> 
		<p>3.6 kW</p> 
		<p>4.8 kW</p> 
<p><b>EE</b></p> 	<p><b>II</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pompă de căldură sol-apă</li> <li>- Captator solar</li> <li>- Sistem de ventilare mecanică cu recuperare de căldură</li> </ul>	

### 6.3. Evaluarea consumului de energie primară

Determinarea consumurilor de energie pentru pachetele propuse s-a făcut utilizând programul EnergyPlus. Construcția modelelor de calcul a pornit de la modelul energetic deja existent al clădirii reale, prin modificarea caracteristicilor pentru a se potrivi fiecărui pachet de eficiență energetică. În baza consumului de energie finală rezultat din programul de calcul a fost calculat consumul de energie primară din surse neregenerabile (denumit și energie primară netă) a fost calculat calculează pentru fiecare pachet. Energia primară din surse neregenerabile se

calculează pe baza energiei livrate și exportate, folosind factori de conversie a energiei primare, 2.62 pentru energie electrică și 1.17 pentru gaz natural. [3]. Astfel, energia primară din surse neregenerabile se calculează ca diferența dintre energia primară corespunzătoare energiei importate din rețea și energia primară corespunzătoare energiei exportate în rețeaua electrică.

#### 6.4. Analiza costului global

Calculul costului global a fost realizat în conformitate cu liniile directe prevăzute de Regulamentul Delegat nr. 244 [3] și standardul EN 15459 [15]. Calculul costului global a fost făcut pe o perioadă de analiză de 30 de ani. A fost utilizată o rată de actualizare de 3%, deoarece este aceeași rată utilizată de autoritățile române în calculele costului global și ale costurilor optime [16]. Costul global a fost calculat în funcție de următoarele categorii de costuri: investiția inițială, costurile de înlocuire, costurile de întreținere, costurile energiei, valoarea reziduală.

#### 6.5. Derivarea nivelului de cost-optim al performanței energetice

În urma calculelor privind energia primară și costurile globale ale fiecăruia dintre pachetele de clădiri propuse, se trasează un grafic pentru a determina nivelurile de cost-optim, dar și pentru a vedea performanța economică și energetică a fiecărei soluții în comparație cu celelalte. Astfel, graficul din Figura 2 prezintă valorile specifice ale energiei primare și ale costurilor globale pentru fiecare pachet de eficiență energetică investigat. În grafic se prezintă și cerința specifică de energie primară pentru clădirile rezidențiale nZEB în zona climatică II, România.

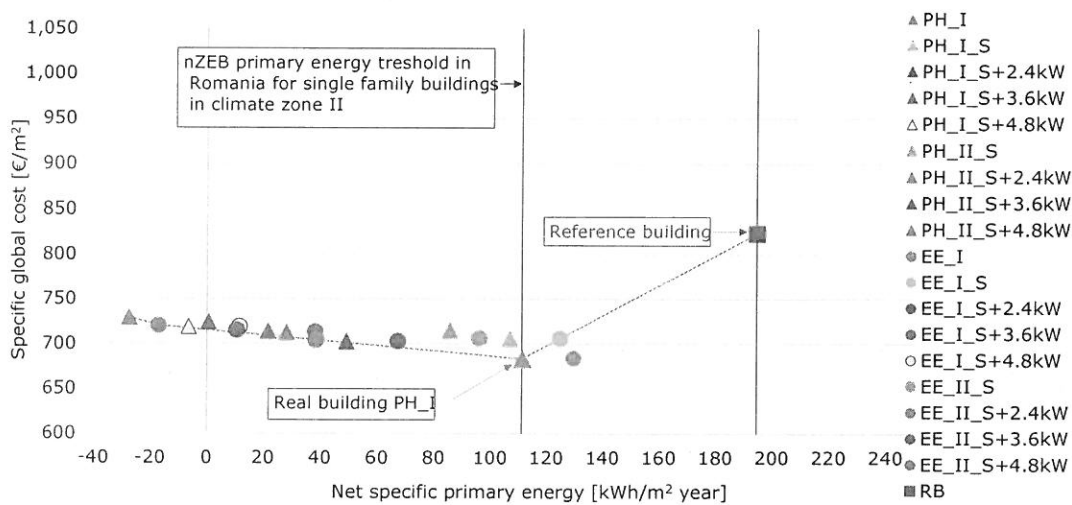


Figura 2 – Energie primară și costul global

#### 6.6. Analiză de sensibilitate la variația ratei de actualizare a costurilor

Calculul costurilor pentru o perioadă extinsă pe mai mulți ani, implică o doză de incertitudine datorită impreviziunilor în evoluția ratei de actualizare. Astfel, s-a efectuat o analiză de sensibilitate pentru diferite rate de actualizare (5%, 1%). Această analiză investighează modul în care costul global este afectat de incertitudinile care sunt incluse în estimările ratei de actualizare. Rezultatele sunt reprezentate în Figura 3, comparativ cu situația de bază (rata de actualizare 3%). Clădirile care au un consum redus de energie nu sunt atât de sensibile la schimbările pe care piața financiară ar putea să le întâmpine pe tot parcursul perioadei de analiză.



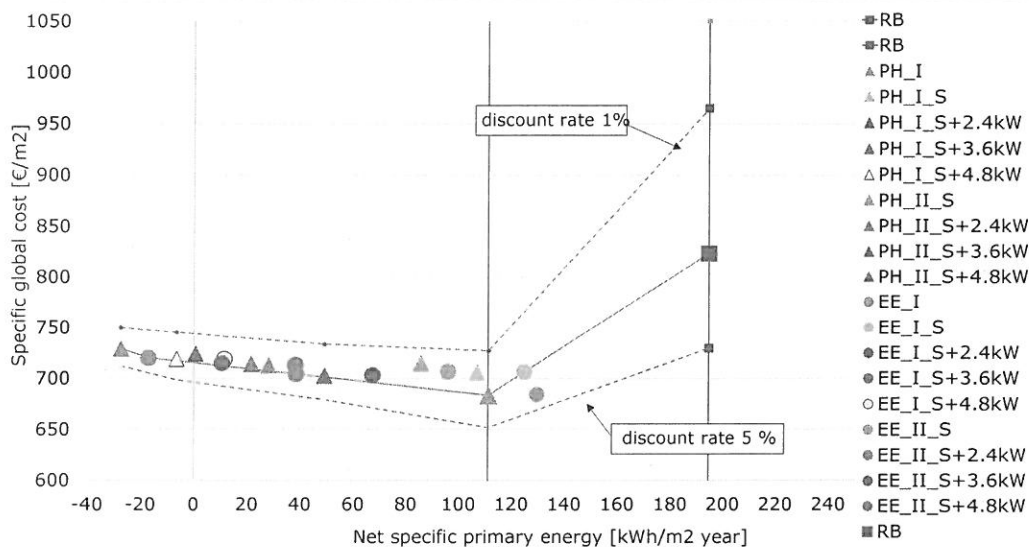


Figura 3 – Analiza sensibilității costului optim la rata de actualizare a costurilor

### 6.7. Analiza sensibilității la evoluția viitoare a prețurilor energiei

O altă analiză a sensibilității prezintă diferite rate de creștere a prețului energiei, comparativ cu scenariul de bază (1.5% pentru energia electrică și 5% pentru gazele naturale). Rezultatele sunt reprezentate grafic în Figura 4. După cum era de așteptat, analiza sensibilității asupra ratei de evoluție a prețurilor energiei arată că pachetele de eficiență energetică cu cel mai mic consum de energie sunt cele mai puțin influențate de evoluția viitoare a prețurilor la energie.

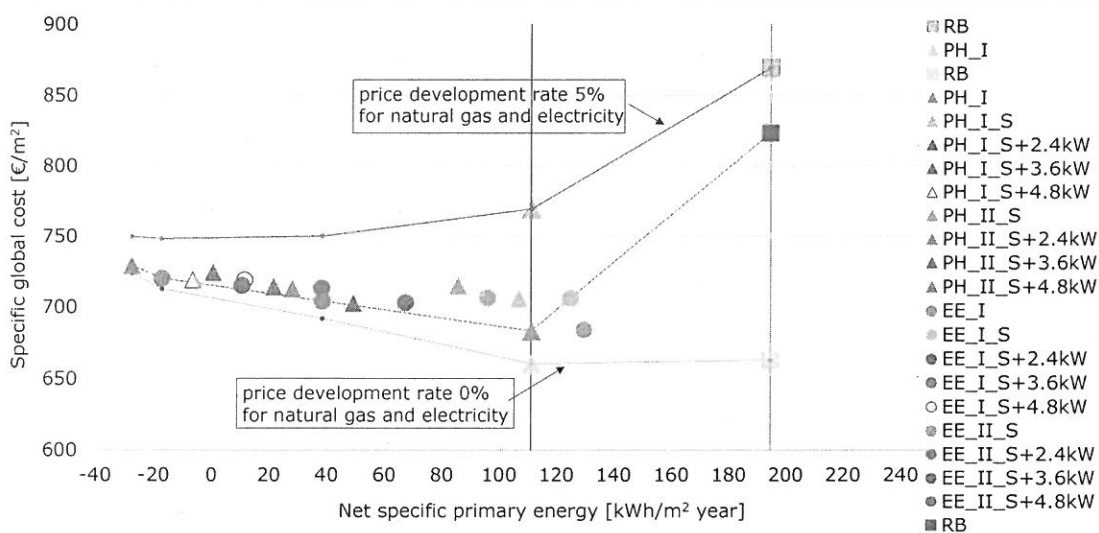


Figura 4 – Analiza sensibilității costului optim la evoluția viitoare a prețurilor energiei

O altă analiză costurilor globale a fost efectuată considerând situația în care surplusul de energie produs de panourile fotovoltaice și exportat în rețeaua națională nu este remunerat. În această situație, a fost remarcată creșterea costurilor globale pentru pachetele de eficiență energetică care includ panouri fotovoltaice, însă acestea rămân în continuare costul global al clădirii de referință.

## 7. Concluzii

### 7.1. Concluziile cercetării

În urma cercetării și a analizei rezultatelor obținute, se pot trage următoarele concluzii principale:

- Studiile și cercetările existente privind consumul de energie în întreaga lume arată că sectorul clădirilor are cel mai mare potențial de reducere a consumului de energie din combustibilii fosili și emisiile de gaze cu efect de seră asociate, deoarece este sectorul cu cea mai mare pondere consumul total global de energie.
- Implementarea unui sistem de monitorizare într-o clădire reprezintă o modalitate de optimizare a consumului real de energie și oferă, de asemenea, datele necesare pentru analiza performanțelor clădirilor, calibrarea și validarea modelelor de calcul.
- Prelucrarea datelor de monitorizare a fost un proces foarte laborios din cauza numărului foarte mare de date înregistrate și a lipsei de instrumente automate pentru a ușura munca.
- Analiza valorilor orare ale temperaturii aerului interior arată că pe tot parcursul anului cele mai frecvente valori se situează în intervalul 22 °C - 23 °C. Numai pentru 3% din numărul total de ore, temperatura aerului interior scade sub 22 °C.
- Casa investigată se confruntă cu supraîncălzirea în timpul verii, în principal datorită lipsei sistemelor de umbrire pentru ferestre. Sistemul de răcire a fost disponibil numai pentru un număr limitat de ore în luna august, aceasta fiind preferința ocupanților clădirii.
- Consumul de energie primară al clădirii, determinat pe baza datelor măsurate, este de 106 kWh/m<sup>2</sup>an, care se situează sub cerința standardului casei pasive (120 kWh/m<sup>2</sup>y) și, de asemenea, sub limita de energie primară pentru clădirile rezidențiale nZEB din România, zona climatică II (111 kWh/m<sup>2</sup>y).
- Se poate spune că această clădire este un exemplu de bună practică pentru atingerea standardului de casă pasivă dar și de clădire cu consum de energie aproape zero.
- Dezvoltarea unui model de calcul energetic pentru simulări orare dinamice este un proces foarte laborios datorită complexității și acurateții datelor de intrare necesare, dar poate duce la rezultate foarte precise.
- Erorile calculate între datele măsurate și simulate se încadrează în limitele de acceptare ale criteriilor de calibrare. Rezultatele precise ale simulării pot fi obținute dacă datele de intrare ale modelului de calcul al clădirii respectă condițiile reale de funcționare.
- Consumul de energie rezultat din simulare este cu 1.11% mai mare decât cel măsurat, ceea ce înseamnă că simularea a rezultat într-o ușoară supraestimare.
- Diferențele dintre consumul lunar de energie măsurat și simulat sunt foarte mici și sunt atribuite în principal consumului de energie pentru încălzire, răcire, ventilare și apă caldă menajeră.
- Pe parcursul întregului an, temperatura măsurată a aerului din interior este mai mică cu o valoare medie de 0.20°C decât temperatura simulată.
- Consumul de energie termică al clădirii investigate poate fi redus cu 8%, respectiv 17%, dacă valoarea setată a temperaturii de încălzire este redusă cu 1 °C (≈21 °C), respectiv 2 °C (≈20 °C).
- Pentru a reduce decalajul dintre consumul de energie teoretic și cel real al unei clădiri, se recomandă ca în faza de proiectare a unei clădiri, să fie făcute mai multe scenarii pentru valoarea setată a temperaturii de încălzire. Astfel, utilizatorii clădirii vor fi conștienți de influența pe care temperatura de încălzire o are asupra consumului de energie și implicit asupra costurilor anuale.
- Implementarea sistemelor de umbrire poate ajuta la reducerea temperaturii aerului din interior în timpul verii. Se poate concluziona că utilizând dispozitive de umbrire și răcire pasivă în timpul nopții prin deschiderea controlată a ferestrelor, temperatura aerului din interior poate fi menținută în limite acceptabile.
- Metodologia costului optim a fost aplicată pentru clădirea studiu de caz, fiind identificate următoarele: trei configurații de clădiri au atins un bilanț energetic negativ (produc mai multă energie decât consumă), o configurație a dus la un bilanț energetic 0, iar unsprezece soluții au condus la un consum de energie primară sub limita nZEB în România și pot fi considerate clădiri cu consum de energie aproape zero.

- Cel mai mic cost global este atins de clădirea reală, dar cu doar o creștere cu 2.8% a costului global, consumul de energie primară al clădirii reale poate fi redus cu 55%.
- Analiza de cost optim arată că standardul de clădire cu consum de energie aproape zero poate fi atins, de asemenea, cu un nivel de izolație mai scăzut decât cel al casei pasive, dacă este combinat cu un sistem tehnic eficient și sistem de panouri fotovoltaice.
- Scenariile care au numărul maxim de panouri fotovoltaice conduc la un surplus de energie.
- Toate pachetele propuse de eficiență energetică au condus la un cost global și consum de energie primară semnificativ mai reduse comparativ cu clădirea de referință.
- Analizele de sensibilitate efectuate pentru diferite rate de actualizare și rate de creștere a prețului energiei indică faptul că scenariile cu consum energetic foarte scăzut nu sunt atât de sensibile la evoluția viitoare a prețurilor sau a ratelor de actualizare, ceea ce înseamnă că acestea pot fi considerate soluții mai sigure față de incertitudinea în privința evoluția pieței de energie.
- Chiar dacă pe termen lung, clădirile cu eficiență energetică se dovedesc a fi mai rentabile decât clădirile de referință, investiția inițială mai mare poate fi un impediment pentru majoritatea proprietarilor de clădiri.
- În cazul soluțiilor optime de cost identificate, investiția inițială este mai mare cu 19%, respectiv cu 32% față de clădirile de referință. Există diferențe mai mari odată cu creșterea sistemelor fotovoltaice sau schimbarea sistemului de încălzire/răcire.
- Gama pachetelor de eficiență energetică investigate include doar două tipuri de sisteme tehnice (cu excepția clădirii de referință) și două configurații de anvelopă termică. Un studiu mai cuprinzător, care include diferite alte configurații, ar putea mări intervalul soluțiilor de cost optim.

### 7.2. Contribuții originale

- Studiul și sinteza unui număr mare de lucrări de cercetare și teze.
- Elaborarea unei strategii și proceduri pentru prelucrarea unui volum mare de date înregistrate de sistemul de monitorizare. Analiza și interpretarea datelor de monitorizare prelucrate.
- Generarea de date de intrare pe baza monitorizării pentru realizarea unui model de calcul energetic al clădirii care reflectă condițiile reale de funcționare.
- Investigarea influenței diferitelor modificări legate de funcționarea clădirii.
- Investigarea posibilității de a reduce temperatura aerului interior în clădire.
- Propunerea și analiza a 19 scenarii de eficiență energetică aplicate clădirii studiului de caz, în termeni de energie primară și cost global.
- Aplicarea metodologiei de cost optim și identificarea unor soluții de cost optim pentru atingerea standardului de clădire cu consum de energie aproape zero.

### 7.3. Recomandări

Sunt propuse următoarele activități viitoare de cercetare:

1. Prelucrarea și analiza statistică a datelor de monitorizare utilizând mai mulți ani de date înregistrate.
2. Îmbunătățirea sistemului de monitorizare cu unele componente noi de măsurare care permit defalcarea consumului de energie al camerei tehnice. Acest lucru va permite o mai bună evaluare a performanței fiecărei componente a sistemelor de instalații.
3. Extinderea studiilor de cost optim la investigarea mai multor pachete de eficiență energetică atât pentru sistemele de instalații, cât și pentru anvelopa clădirii, pentru a oferi o gamă mai largă de soluții.
4. Extinderea studiilor de cost optim pentru toate zonele climatice din România, ținând cont de condițiile specifice fiecărei zone, dar și de cerințele naționale de energie primară pentru clădiri cu consum de energie aproape zero pentru fiecare zonă climatică.

## Mențiuni

This work was partially supported by a grant of the Romanian National Authority for Scientific Research, CNDS-UEFISCDI; project number PN-II-PT-PCCA-2011-3.2-1214 Contract 74/2012.

## Bibliografie

- [1] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directive 2004/8/EC and 2006/32/EC.
- [2] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
- [3] Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings.
- [4] Defining the nearly zero-energy building: Passive House + renewables, the PassREg Project – Passive House Regions with Renewable Energies, Passive House Institute, 2015.
- [5] Kurnitski, J. (2013), "Technical definition for nearly zero energy buildings", REHVA Journal, May 2013, Vol. 50, Issue 3, 22-28.
- [6] Chong, Zhun Min Adrian, "Bayesian calibration of building energy models for large datasets" (2017), Dissertations. 1006. Available at: <<http://repository.cmu.edu/dissertations/1006>>.
- [7] Augenbroe, G., "Trends in building simulation", Building and Environment, vol. 37, issue 8-9, 891-902.
- [8] Maile, T., Bazjanac, V., Fischer, M. (2012), "A method to compare simulated and measured data to assess building energy performance", Building and Environment, vol. 56, 241-251.
- [9] <<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>.
- [10] <<http://www.trnsys.com/>>.
- [11] Garcia, O., Prieto, J., Alonso, R.S., Corchado, J.M., (2017), "A Framework to Improve Energy Efficient Behaviour at Home through Activity and Context Monitoring", Sensors, vol. 17 (8). Available from: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/8/1749> .
- [12] ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy Demand and Savings; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA, 2002.
- [13] <<http://energyplus.net/>>.
- [14] ORDIN nr. 2641 din 4 aprilie 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.
- [15] EN 15459 -European Standard EN 15459:2006, Energy Efficiency for Buildings. Standard economic evaluation procedure for energy systems in buildings, 2006.
- [16] Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice, Nearly Zero Energy Buildings (NZEB) Romania – Plan de creștere a numărului de clădiri al căror consum de energie este aproape egal cu zero, July 2014. Available from: [http://www.mdrap.ro/userfiles/metodologie\\_calcul\\_performanta\\_energetica\\_iulie2014.pdf](http://www.mdrap.ro/userfiles/metodologie_calcul_performanta_energetica_iulie2014.pdf).