

# Spremljanje delovanja napredno načrtovane skoraj nič-energijske večstanovanjske stavbe

Henrik Gjerkeš, Miha Mirtič, Gašper Stegnar, Marjana Šijanec Zavrl

Gradbeni inštitut ZRMK, Center za bivalno okolje, gradbeno fiziko in energijo, Ljubljana

## Povzetek

Učinkovita raba energije in intenzivnejše izkoriščanje obnovljivih virov energije tudi v stanovanjskem sektorju zahteva sodobne pristope k naprednemu načrtovanju stavb ob hkratni skrbi za ustrezno bivalno ugodje v njih. Nacionalna merila za skoraj nič-energijske stavbe (sNES), ki bodo postala obvezna l. 2020, smo uporabili kot izhodišče za načrtovanje Eko srebrne hiše, večstanovanjske stavbe s 128 stanovanji, ki je bila kot FP7 EE-Highrise demonstracijski projekt l. 2015 zgrajena v Ljubljani. Načrtovanje in gradnja sta potekala z naprednimi orodji za dinamično simulacijo na urni osnovi z realnimi robnimi pogoji, s sprotim spremljanjem kakovosti, kontrolo zrakotesnosti, spremljanjem rabe energije in parametrov bivalnega ugodja. Primerjava projektiranih in izmerjenih ključnih parametrov v izbranih naseljenih in še nenaseljenih stanovanjih pokaže učinkovitost naprednih orodij za načrtovanje stavb, pri čemer podrobnejša analiza izlušči tudi vzroke za nekatera odstopanja.

## Uvod

Ob uvedbi nove kategorije energetske učinkovitih stavb v slovensko (in evropsko) zakonodajo, poimenovane *skoraj ničenergijske stavbe* (sNES), ki bo v stanovanjskem sektorju postale obvezne l. 2020, investitorje, lastnike in tudi najemnike zanima, kakšne so prednosti gradnje ali bivanja v stavbah, ki so zgrajene/prenovljene po novih merilih. Brez dvoma za investitorje/lastnike sNES predstavlja prednost pri prodaji, višjo vrednost na trgu in skrbno načrtovanje, ki zniža stroške gradnje, medtem ko za najemnike sNES merila zagotavljajo dobro bivalno udobje, nižje obratovalne stroške in ne nazadnje tudi zadovoljstvo ob bivanju v naravnem in našim zanamcem prijaznem grajenem okolju [1].

Načrtovanje gradnje/prenove sNES zahteva nadgradnjo postopka načrtovanja že od samega začetka in uporabo postopkov in orodij za napredno načrtovanje stavb. Integralno načrtovanje z enakopravnim in pravočasnim sodelovanjem kompetentnih strokovnjakov bistveno zviša gotovost za doseganje zelenih lastnosti stavbe, hkrati pa se na ta način izognemo neuskkljenemu načrtovanju, pogostokrat tudi nekritičnemu vključevanju novih tehnologij, ki imajo lahko za posledico nezadovoljnega uporabnika stavbe. Spremembe pozno v procesu načrtovanja ali celo med/po izgradnji stavbe so povezane z bistveno višjimi stroški ob omejenem učinku. V integralno načrtovanje vključeni strokovnjaki imajo specifična znanja ter obvladujejo programska orodja in merilne sisteme za spremljanje doseženih lastnosti sNES stavb, ki zahtevajo visok nivo toplotnega, zvočnega in svetlobnega ugodja ob čim manjšem okoljskem odtisu uporabljenih materialov in energentov ter druge zahteve trajnostne gradnje.

Tudi pri nas že lahko srečamo investitorje, ki se zavedajo gospodarnosti integralnega načrtovanja z naprednimi orodji, pa čeprav je v začetku nekoliko dražje. Eden od tovrstnih primerov je lani zgrajena Eko srebrna hiša v Ljubljani - 12-etažna večstanovanjska stavba s 128 stanovanji, ki predstavlja primer dobre prakse gradnje v skladu s trajnostnimi in sNES načeli v praksi. Eko srebrna hiša je demonstracija uspešnega integralnega načrtovanja, podkrepjenega z interdisciplinarno kontrolo kakovosti v vseh fazah projekta, kljub pomanjkanju tovrstnih izkušenj in velike skupine vključenih deležnikov. V

nadaljevanju bomo pokazali nekatere dosežene rezultate, ki jih bomo predvsem zaradi gradnje stanovanj v Eko srebrni hiši za trg, torej interesa novih stanovalcev, prikazali v kontekstu energetske učinkovitosti in bivalnega ugodja.

### **Modeliranje**

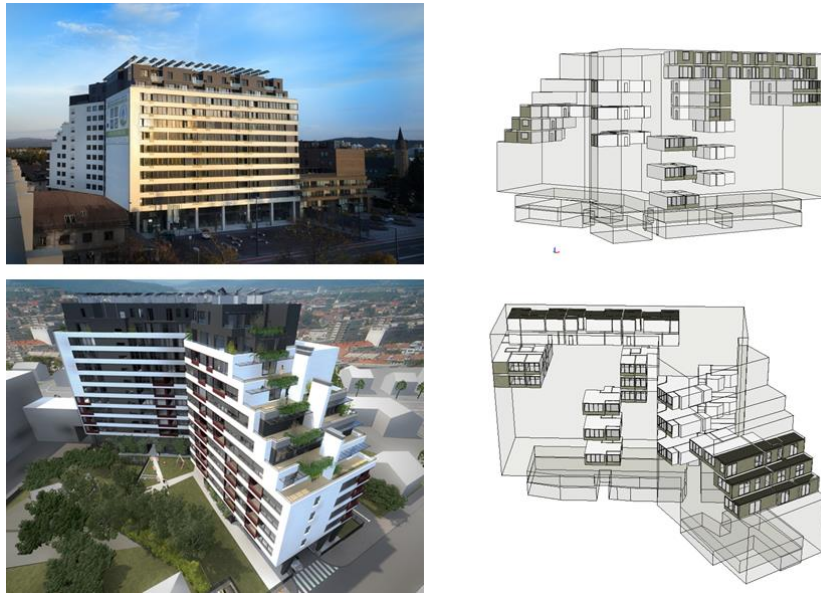
Modeliranje dinamičnega toplotnega odziva stavbe smo izvedli z računalniškim programom IDA ICE (Indoor Climate and Energy) [2]. Izdelali smo natančno topologijo celotne stavbe z natančnimi atributi vseh elementov stavbe in sistemov, tako da je bilo mogoče na osnovi realnih klimatskih podatkov z enournim časovnim intervalom simulirati obnašanje stavbe ali njenih posameznih delov pri različnih robnih pogojih in zahtevah. Za klimatske podatke smo uporabili podatke referenčnega leta za Ljubljano, tj. 365-dnevni niz urnih vrednosti izbranih meteoroloških spremenljivk, ki so potrebne za izračun energijske bilance stavbe. Dinamično določevanje rabe energije zahteva dinamične robne pogoje uporabe stanovanja (polna zasedenost zjutraj, popoldne in zvečer med delavniki ter stalna čez vikend), ki definira notranje energijske tokove (notranji viri, razsvetljava, prezračevanje, priprava sanitarne tople vode). Za umerjanje dinamičnega modela smo uporabili izmerjene vrednosti rabe toplotne in električne energije in izmerjeno temperaturo v prostorih.

### **Meritve**

S pomočjo merjenja parametrov zraka znotraj stanovanj in zunaj stavbe ter parametrov ogrevalnega in prezračevalnega sistema smo lahko pri različnih nastavitvah robnih pogojev (temperatura v stanovanju, režim senčenja, režim prezračevanja,...) spremljali toplotni odziv posameznega stanovanja in Eko srebrne hiše v celoti. Zaradi višje gotovosti izmerjenih rezultatov in različnih navad stanovalcev smo izbrali 20 stanovanj, razdeljenih v skupine po tri na osnovi velikosti, orientacije in položaja posameznega stanovanja v stavbi in jih opremili z dodatno merilno opremo, tako da merilni sistem posameznega stanovanja skupaj s standardno opremo sestavljajo naslednji elementi:

- dva kalorimetra, ki merita (i) celotno dovedeno toplotno energijo v stanovanje, in (ii) toplotno energijo za ogrevanje prostorov. Toplotna energija za ogrevanje sanitarne vode je razlika toplotno energijo obeh kalorimetrov
- merilnik rabe električne energije za pogon in kondicioniranje zraka v prezračevalnem sistemu
- merilnik rabe električne energije za klimatizacijsko napravo
- oprema za vzorčenje signala stanja oken (odprto, zaprto) in senčil
- vzorčenje parametrov zraka v stanovanju
- vzorčenje rabe toplotne in električne energije na ravni stavbe
- vzorčenje klimatskih podatkov (med drugim temperature, relativne vlažnosti, vetra in sončnega obsevanja)

Lega izbranih stanovanj je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Model Eko srebrne hiše in prikaz izbranih, dodatno merjenih stanovanj v okviru FP7 EE Highrise.

Merilna oprema omogoča merjenje energije za ogrevanje, za pripravo tople sanitarne vode in električne energije. Te meritve, skupaj z merjenjem profila rabe stanovanja (naseljeno/prazno stanovanje, odpiranje oken, senčenje, razsvetljava, notranja temperatura,...) in podatki o gradbeni fiziki (definicija toplotne cone, območja zrakotesnosti, termografska analiza,...) pri različnih robnih pogojih omogočajo ustrezno ekstrapolacijo in oceno toplotne karakteristike stavbe kot celote.

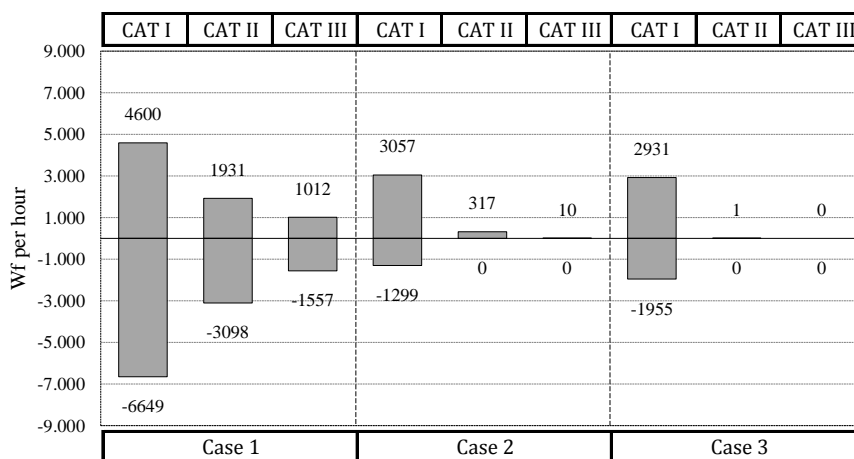
### Bivalno ugodje

Občutek toplotnega ugodja dosežemo takrat, ko so energijski in snovni tokovi v ravnovesju na ustreznem nivoju. Pri energijsko učinkoviti zasnovi stavbe po sNES kriterijih smo upoštevali, da je z vidika rabe energije najpomembnejše toplotno ugodje, ki ga določajo temperatura zraka v prostoru, temperatura obodnih površin, vlažnost in hitrost gibanja zraka.

Pri energijski bilanci in bivalnem okolju pomembno vlogo igrajo toplotni dobitki skozi zastekljene površine. Načrtovanje Eko srebrne hiše je vsebovalo analizo treh scenarijev senčenja v stanovanjskih enotah:

- steklene površine niso senčene (Case1)
- steklene površine so stalno zastrte (Case2)
- steklene površine so senčene s krmiljenjem lege žaluzij v povratni zanki glede na sprotne merjene pogoje (ključna sta temperatura v prostoru in sončno sevanje) (Case3)

Toplotno ugodje smo ocenili preko indeksov PMV (Predicted Mean Vote) in PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) glede na kategorije (CAT I, CAT II in CAT III). PMV podaja pričakovano povprečno oceno toplotnega okolja večjega števila ljudi s pomočjo sedemstopenjske lestvice, medtem ko PPD podaja pričakovan odstotek nezadovoljnih uporabnikov prostora (skladno s standardoma SIST EN ISO 7730:2005 [3] in EN 15251 [4]). Standarda dopuščata več konceptov obravnave ugodja, na koncu pa vsi vodijo do enakih rezultatov [5]. Bivalno ugodje kvantificiramo z kvocientom  $W_f$ , ki predstavlja čas, v katerem je dejanski PMV izven meja toplotnega ugodja, utežen s faktorjem, ki je funkcija PPD.  $W_f$  je enak 0, če se izračunan PMV indeks nahaja v območju meja toplotnega ugodja, ki jih predpisuje standard.



Slika 2: Vpliv sončnih dobitkov skozi zastekljene površine v Eko srebrni hiši brez senčenja (Case1), s stalno zastrtimi okni (Case2) in z reguliranim senčenjem (Case3) na bivalno ugodje.

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, ki določa pogoje za doseganje bivalnega ugodja v stavbah, predpisuje zahteve, ki ustrezajo kategoriji II (CAT II). Rezultati dinamičnega modeliranja toplotnega odziva Eko srebrne hiše pri predvidenih scenarijih senčenja, s katerim smo določili indeksa PMV in PPD za vsako uro v letu kažejo, da s kontroliranim senčenjem (Case 3) dosežemo (predpisane) zahteve kategorije II toplotnega ugodja v poljubni stanovanjski enoti Eko srebrne hiše. Z ustreznim krmiljenjem senčil je dosežena bilanca energijskih tokov na način, da se kvocient  $W_f$  zgolj v sledi nahaja izven območja meja toplotnega ugodja za stanovalce. Slika 2 kaže, da scenarija, ko steklene površine niso bile senčene (Case 1) oz. so bila senčila stalno zastrta (Case 2), bistveno slabše zagotavljata toplotno ugodje v predpisanem območju in s tem tudi povzročita večji delež nezadovoljnih uporabnikov prostora.

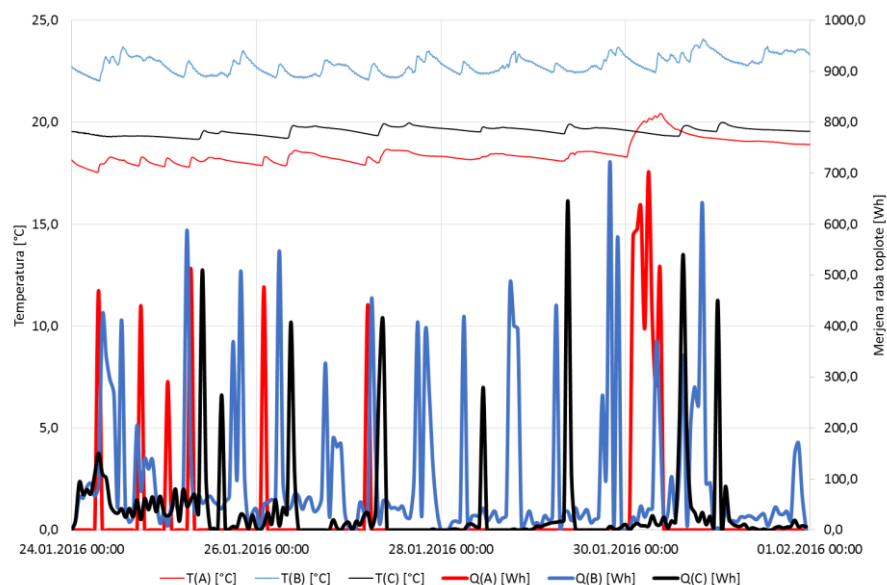
### Analiza toplotnega odziva

V analizi smo zajeli tri izbrana stanovanja, označena s črkami A, B in C, od katerih sta stanovanja A in B naseljeni, stanovanje C pa prazno (še neprodano). Z analizo želimo primerjati načrtovane toplotne karakteristike stanovanj z dejanskimi. Pri praznem stanovanju smo lahko neposredno primerjali ujemanje načrtovanih karakteristik stavbe pri standardnih pogojih, medtem ko pri naseljenih stanovanjih na energetsko učinkovitost v večji ali manjši meri vplivajo tudi navade stanovalcev, torej način rabe stanovanja.

Za umerjanje dinamičnega modela smo uporabili niz meritev rabe energije pri natančno znanem profilu rabe stanovanja, gradbeno-fizikalnih parametrov stavbe in izmerjenih klimatskih podatkih na lokaciji ob istem času. Na sliki 3 je za stanovanja A, B in C prikazana izmerjena temperatura v stanovanju (definirana z nastavljenimi zelenimi vrednostmi, ki jo preko krmilnega sistema poskuša ogrevalni sistem vzdrževati ne glede na motnje iz okolice) in izmerjen dovod toplote v zadnjem tednu januarja 2016. Stanovalci v stanovanju A, ki je sicer imel lastnika, vendar režim rabe ni bil znan, so imeli v navedenem časovnem intervalu do 30. 1. nastavljen temperaturo v prostorih 18 °C, zatem so jo zvišali na 19 °C. V stanovanju B so stanovalci imeli ves teden nastavljen temperaturo v prostoru na 23 °C, medtem ko je upravnik stavbe v praznem stanovanju C nastavljen temperaturo v prostorih na 19,5 °C. Na sliki 3 lahko vidimo prehodno karakteristiko krmilnega algoritma, ki s krmiljenjem pretoka tople vode skozi radiator z ON-OFF ventili krmili dovod toplote v prostor in na ta način dosega željeno temperaturo v prostoru. Kalorimeter ne integrira odčitkov med intervalom vzorčenja, ampak odčita trenutno moč vsakih 15 min, zato se lahko zgodi, da izmeri prehodni pojav ob odprtju ventila. V izogib

nerealno visokim odčitkom trenutne toplotne moči smo meritve kalorimetra integrirali v intervalu 1 h, kar je tudi časovni korak simulacije z dinamičnim modelom.

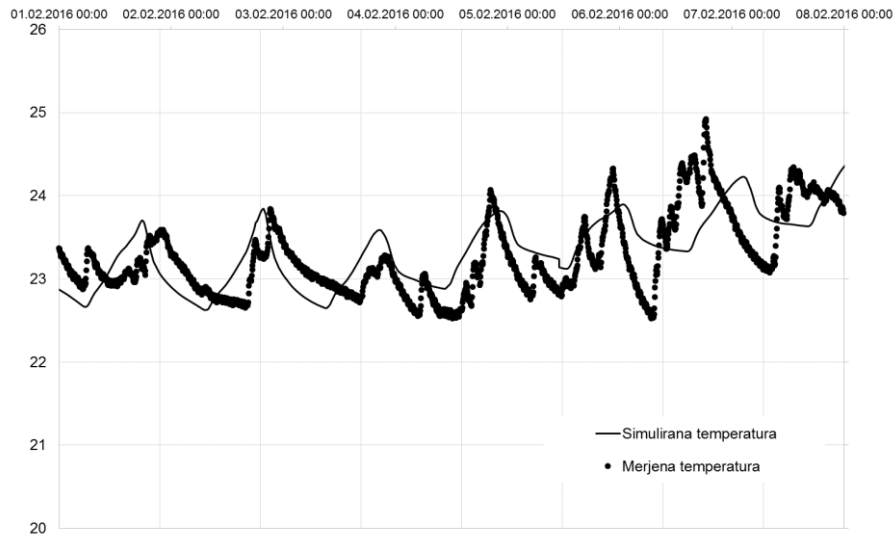
Na sliki 3 se vidi pogostejši vklop dovoda toplote v stanovanju B z višjo nastavljenno temperaturo prostorov, kot v prav tako naseljenem stanovanju A. Stanovalci v obeh stanovanjih so imeli senčenje nastavljen na samodejni scenarij (Case3 na sliki 2), ki zagotavlja dobro bivalno ugodje. Dovod toplote je potreben za pokrivanje transmisijskih in ventilacijskih toplotnih izgub, ki so večje pri višji temperaturni razliki med notranjostjo stanovanja in zunanjim zrakom. Z upoštevanjem toplotnih dobitkov (sončno sevanje, notranji viri) in dobre toplotne izolacije stavbe po merilih sNES ima stanovanje A z varčnimi stanovalci frekvenco dovoda toplote (14 krat v tednu) v opazovanem tednu bistveno nižjo (ob približno enaki amplitudi zaradi enake projektne temperature na primarni strani toplotne postaje 65 °C), kot stanovanje B s toplotno bolj potratnimi stanovalci (35 krat v tednu). Pri nenaseljenem stanovanju se je ventil za dovod toplote za ogrevanje stanovanja v enakem časovnem intervalu odprl 12 krat.



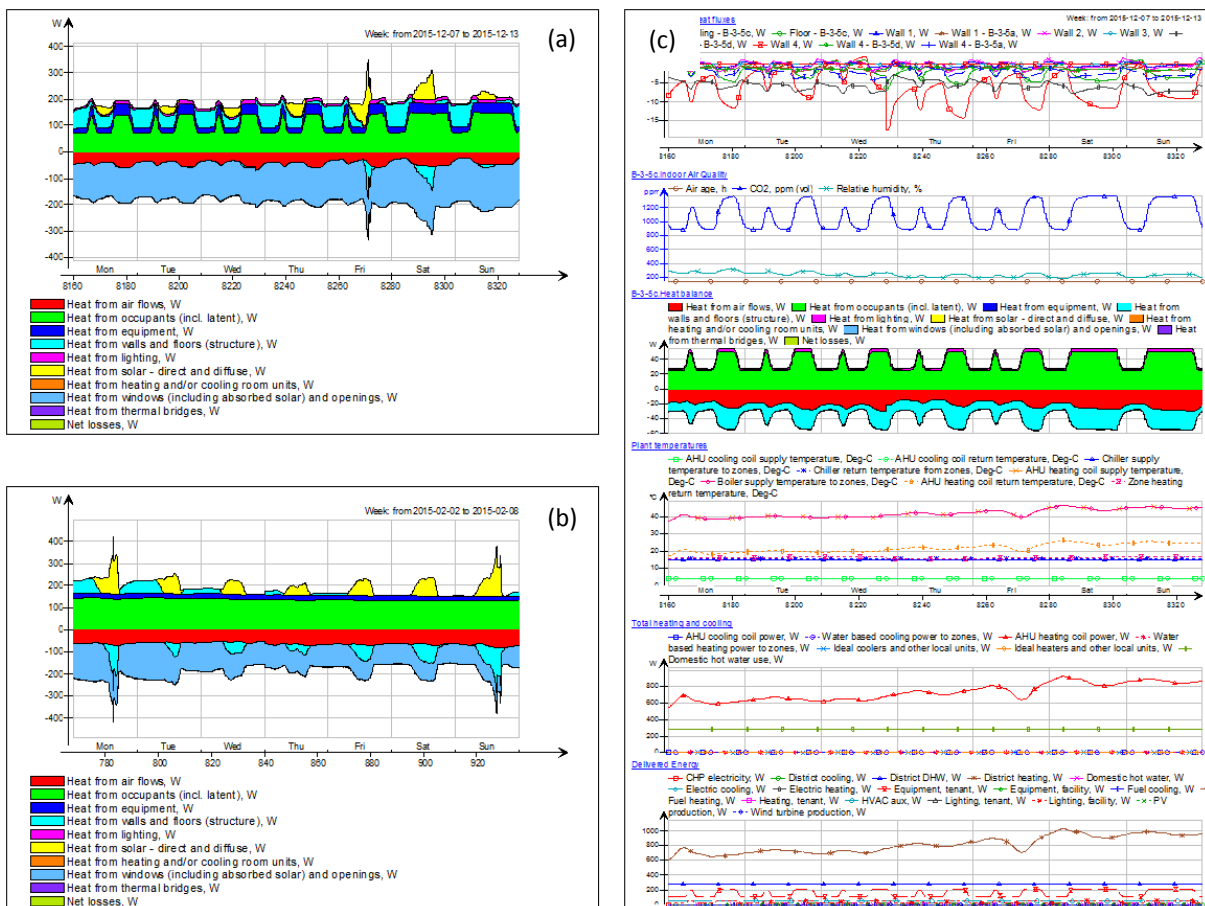
Slika 3: Izmerjena temperatura T in dovedena toplota Q v stanovanjih A, B in C med 24. 1. in 1. 2. 2016.

S primerjanjem robnih pogojev, s katerimi smo z modelom ujeli temperaturni profil v stanovanju, smo ugotovili odstopanje dejanskih od načrtovanih pogojev uporabe. Slika 4 prikazuje izmerjeno in z umerjenim dinamičnim modelom v IDA ICE programu simulirano temperaturo v stanovanju B med 1. in 8. februarjem 2016. Dobro ujemanje kaže na adekvatnost modela in ustrezno izbrane robne pogoje.

Kalibracijo dinamičnega modela s pomočjo nekaterih izmerjenih parametrov smo izvedli s pomočjo analize in bilance energijskih tokov. Primer na sliki 5(a) prikazuje bilanco toplotnih tokov za stanovanje B v poletnem času, na sliki 5 (b) pa v zimskem času. Ostali za analizo toplotnih tokov pomembni parametri (kot so masni pretok - merjeni in simulirani, notranja temperatura, dnevna svetloba, kakovost zraka), ki vplivajo na toplotni odziv stanovanja, so prikazani na sliki 5 (c). Ujemanje ključnih parametrov z izmerjenimi vrednostmi predstavlja verifikacijo modela in njegovo adekvatnost za realistično simuliranje toplotnega odziva stanovanja pri različnih robnih pogojih.



Slika 4: Primerjava izmerjene in z dinamičnim modelom simulirane temperature v stanovanju B med 1. 2. in 8. 2. 2016.

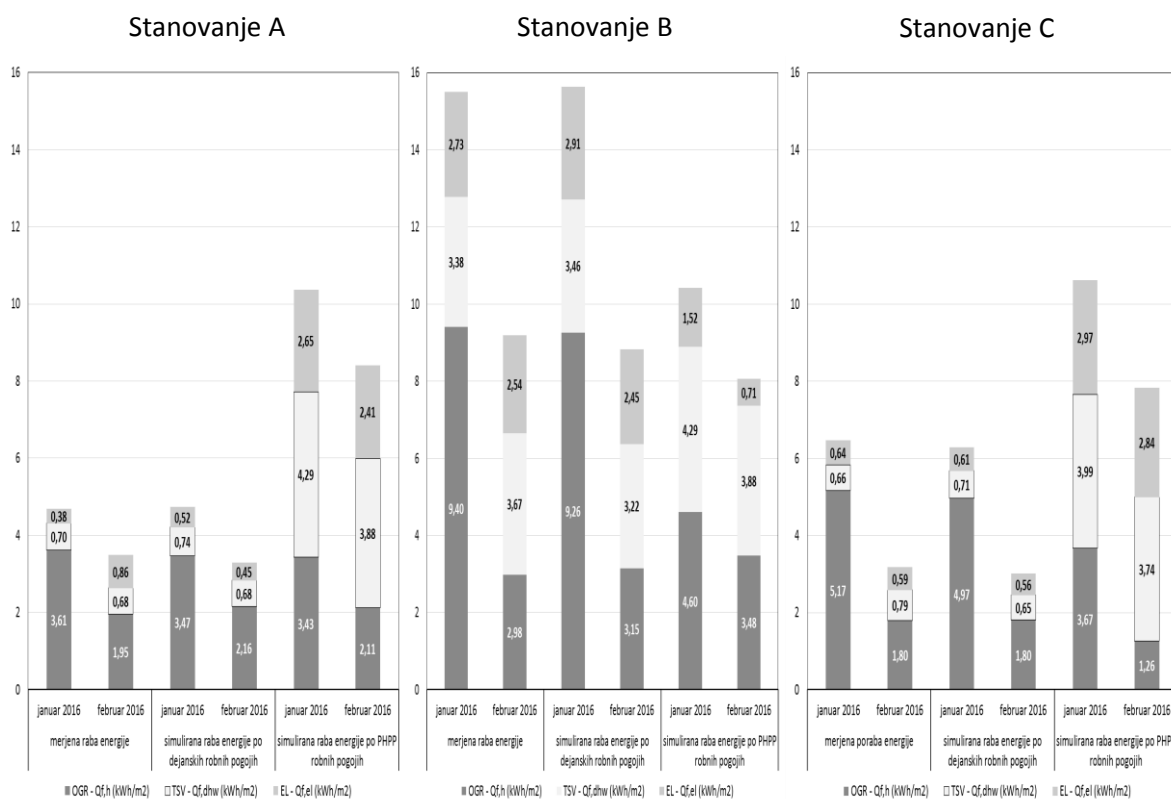


Slika 5: Analiza in bilanca toplotnih tokov v stanovanju B v poletnem (a) in zimskem (b) tednu s podrobnejšim prikazom nekaterih parametrov v zimskem tednu (c).

## Analiza energetske učinkovitosti

Z analizo energetske učinkovitosti izbranih stanovanj A, B in C smo želeli ugotoviti, če je toplotni odziv stanovanj v skladu z načrtovanimi oz. predpisanimi standardi pasivne stavbe. Na sliki 6 so prikazani rezultati rabe energije za ogrevanje stanovanja, ogrevanje sanitarne vode in električne energije za stanovanja A, B in C. Izmerjeni rezultati in kalibracija modela so izvedeni za prva dva meseca I. 2016 in temeljijo na natančno beleženih aktivnostih v vsakem stanovanju in robnih pogojih, ki pomembno vplivajo na energijsko bilanco, kot je to na primer nastavljena notranja temperatura, izmerjena notranja temperatura, stopnja prezračevanja, notranji viri, režim uporabe stanovanja, ipd. Izmerjeno rabo energije (prvi par stolpcev, prvi za januar, drugi za februar 2016) smo primerjali z rezultati kalibriranega dinamičnega modela pri dejanskih robnih pogojih (drugi par stolpcev). Tretji par stolpcev prikazuje s kalibriranim dinamičnim modelom simulirano rabo energije s PHPP robnimi pogoji za pasivno stavbo, pri čemer smo uporabili ekvivalentne robne in začetne pogoje, kot so določeni v PHPP izračunu za celotno stavbo: stopnja prezračevanja, notranji viri, zasedenost, razsvetljava idr.

Stanovanje A (neto kondicionirana površina stanovanja je 48,51 m<sup>2</sup>, vzhodna lega) je bilo sicer prodano, vendar glede na rezultate v prvih dveh mesecih še ni bilo stalno naseljeno. Temperatura v prostorih je bila nastavljena med 18 in 20 °C, rabe energije za ogrevanje sanitarne vode (recirkulacija) in električne energije (prezračevanje) je nizka. Edini vir energijskih dobitkov praznega stanovanja je (omejeno zaradi vzhodne lege) sončno sevanje skozi okna. Dvomesečno povprečje rabe energije za ogrevanje v januarju in februarju 2016 je znašalo 2,78 kWh/m<sup>2</sup> na mesec in se dobro ujema z rezultati IDA ICE dinamičnega podela s PHPP robnimi pogoji za pasivno stavbo.



Slika 6: Analiza rabe energije za ogrevanje stanovanja, ogrevanje sanitarne vode in električne energije za stanovanja A, B in C za januar in februar.

Stanovanje B (56,49 m<sup>2</sup>, zahodna lega) je prodano in naseljeno. Stanovalci so nastavili temperaturo v stanovanju na 23 °C. Rezultati simulacije s kalibriranim IDA ICE modelom z dejanskimi robnimi pogoji v najslabšem primeru odstopajo za manj kot 12 %. Primerjava z rezultati simulacije s PHPP robnimi pogoji kaže na bistveno večjo rabo energije za ogrevanje prostorov, kar je predvsem posledica navad stanovalcev, vključno z individualnim dojemanjem bivalnega ugodja, ki je v tem primeru pri 3 K višji temperaturi, kot so standardni pogoji. Dvomesečno povprečje rabe energije za ogrevanje v januarju in februarju 2016 je znašalo 6,19 kWh/m<sup>2</sup> na mesec. Na visoko rabo za ogrevanje vpliva tudi dejstvo, da ima stanovanje B enega od največjih deležev zunanjih površin med vsemi stanovanji v Eko srebrni hiši, kar tudi vpliva na večje transmissijske izgube.

Stanovanje C (84,45 m<sup>2</sup>, lega vzhod-zahod) je neprodano in prazno. Zelena temperatura v prostorih je nastavljena na 19,5 °C, rabe energije za ogrevanje sanitarne vode (recirkulacija) in električne energije (prezračevanje) je nizka. Dvomesečno povprečje rabe energije za ogrevanje v januarju in februarju 2016 je znašalo 3,49 kWh/m<sup>2</sup> na mesec, kar je primerljivo s stanovanjem A, ki je imelo nastavljeno 1 do 2 K nižjo temperaturo v prostorih.

Rezultati simulacije s PHPP robnimi pogoji kažejo, da je v stavbi, grajeni po merilih sNES, kot je Eko srebrna hiša, raba toplote za ogrevanje prostorov v povprečno hladni zimi lahko nižja, kot je raba toplote za ogrevanje sanitarne vode in znaša le še 30 do 40 % celotne rabe energije za delovanje stavbe. Seveda pa je to v veliki meri odvisno od načina rabe stanovanja in ustreznega obravnavanja virov in dobitkov toplote, ki lahko pri tako nizki potrebi po energiji za ogrevanje prav tako pomembno vplivajo na bivalno ugodje v stavbi.

## **Zaključki**

Z analizo in primerjavo projektiranih, izmerjenih in simuliranih parametrov v izbranih stanovanjih Eko srebrne hiše smo preverili učinkovitost naprednih orodij za integralno načrtovanje stavb. Na primeru treh stanovanj smo pokazali, da simulacija s kalibriranim IDA ICE dinamičnim modelom ob ustreznih in realističnih robnih pogojih, dejanskim profilom rabe stanovanja in podatkih o gradbeni fiziki daje adekvatne rezultate toplotnega odziva stanovanja in omogoča analizo toplotnih tokov. Dinamična bilanca toplotnih tokov podaja podroben vpogled v delovanje stavbe in njenih komponent v različnih pogojih, kar predstavlja dobro osnovo za optimizacijo energetske učinkovitosti in bivalnega udobja v stavbi, vključno z delovanjem senčil in drugih virov in dobitkov toplote. Razloge za nekatera odstopanja rezultatov dinamičnega modela od izmerjenih vrednosti lahko iščemo predvsem v pričakovanem odstopanju dejanskih pogojev bivanja v stanovanju (temperatura, prezračevanje,...), ki so posledica različnih navad in dojemanja udobja stanovalcev, in v primeru Eko srebrne hiše v še ne optimalni nastavitvi in sinhronizaciji sistemov zaradi komaj dokončane gradnje.

## **Zahvala**

*Izvedbo demonstracijskega projekta, ki obsega stanovanjski del stavbe s tehnologijami za izrabo obnovljivih virov energije in deževnice, sofinancira Evropska komisija v okviru demonstracijskega projekta FP7 EE HIGHRISE – demonstracijski projekt izgradnje energijsko učinkovite trajnostne stavbe Eko srebrna hiša v Ljubljani (2013 - 2016). Več informacij se nahaja na spletni strani: [www.ee-highrise.eu](http://www.ee-highrise.eu).*

## **Viri**

[1] Šijanec-Zavrl, M., Stegnar, G., Gjerkeš, H. Demonstration of the nearly zero energy building concept. Journal of geoscience and environment protection, vol. 3, no. 6, str. 45-54, 2015.

[2] IDA Indoor Climate and Energy v.4.7. EQUA Simulation AB, Stockholm, Švedska.



[3] EN 7730. Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2007.

[4] EN 15251. Indoor environment input parameters for design and assessment of energy performance of the buildings - addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, 2007.

[5] D. Raimondo, S. P. Corgnati in B. W. Olesen, Evaluation methods for indoor environmental quality assessment according to EN 15251, " REHVA European HVAC Journal, No. 46, pp. 14-19, 2012.