

**ENERGY PERFORMANCE OF INFILTRATED AND ELEVATIONAL EARTH-
SHELTERED BUILDINGS IN THE TERRITORY OF THE CITY OF KRAGUJEVAC –
A NUMERICAL INVESTIGATION**

Прегледни рад, рад примљен: јун 2023, рад прихваћен: новембар 2023.

Александар Нешовић*

АПСТРАКТ

У овом раду истражен је енергетски потенцијал различитих типова савремених земуница, током седмомесечног временског периода (од 1. октобра до 30. априла), у циљу достизања одрживог развоја. Предмет истраживања је једноспратна стамбена зграда (укупне нето површине 102,5 m²), намењена боравку четворочлане породице, лоцирана на подручју града Крагујевца (централна Србија). Систем грејања формирају топлотна пумпа типа земља-вода, геотермалне вертикалне сонде, подни панелни грејачи и две циркулационе пумпе. Нумеричком анализом (користећи софтвер EnergyPlus) истражена су четири типа инфилтрираних, као и једна елевациона земуница. Енергетске перформансе свих поменутих земуница упоређене су са енергетским перформансама класичне надземне зграде. Све зграде су истих геометријских, грађевинских и термотехничких перформанси. Резултати истраживања показали су да се, у инфилтрираним земуницама, годишња потрошња финалне (електричне) енергије може редуковати за 2,53–21,64% (зависно од броја спољашњих грађевинских елемената у директном контакту са земљиштем). Савремена архитектура ипак треба бити усмерена на развој елевационих земуница, јер се у њима годишња потрошња финалне (електричне) енергије за грејање може редуковати за преко 40%.

Кључне речи: земуница, енергетска ефикасност, EnergyPlus, Google SketchUp, параметри локације.

ABSTRACT

This paper investigates the energy potential of different modern earth-sheltered building types, during a seven-month period (October 1 to April 30), in order to achieve sustainable development. The subject of the research is a one-story residential building (total net area 102.5 m²), intended for a family of four, located in the territory of the city of Kragujevac (central Serbia). The heating system consists of a ground source heat pump, geothermal vertical probes, floor panel heaters, and two circulation pumps. Four types of infiltrated earth-sheltered buildings, as well as one elevational earth-sheltered building, were investigated by numerical analysis (using the EnergyPlus software). The energy performances of all of the mentioned earth-sheltered buildings were compared with the energy performance of classic above-ground building. All of the buildings have the same geometric, construction, and thermotechnical performance. The research results show that, in infiltrated earth-sheltered buildings, the annual consumption of final (electrical) energy can be reduced by 2.53–21.64% (depending on the number of external building elements in direct contact with the soil). Modern architecture should still be focused on the development of elevational earth-sheltered buildings because in them the annual consumption of final (electrical) energy for heating can be reduced by more than 40%.

Keywords: earth-sheltered building, energy efficiency, EnergyPlus, Google SketchUp, location parameters.

1.0 УВОД

Развој концепта енергетски ефикасних зграда¹ кроз историју произишао је из потребе да се (првенствено) стамбени сектор приближи одрживом развоју (Ionescu et al., 2010). Иако је од почетка XXI века ова идеја била подржана разним националним правним актима (Službeni glasnik RS, 2011, 2012), удео стамбеног сектора Републике Србије у потрошњи финалне енергије, према подацима ODYSSEE-MURE (2021), и даље је висок (34%).

* Александар Нешовић, истраживач сарадник, Универзитет у Крагујевцу, Институт за информационе технологије, Јована Цвијића бб, 34000 Крагујевац, Србија, asa.nesovic@gmail.com, ORCID 0000-0002-1690-2389

1 енгл. Energy Efficient Buildings

Енергетске уштеде које се остварују спровођењем термичких санација на постојећим стамбеним зградама, а које локалне самоуправе форсирају издвајањем одређених новчаних субвенција (Službeni glasnik RS, 2022), довољне су да се достигну тренутни минимални енергетски захтеви (Službeni glasnik RS, 2011).

Међутим, глобална енергетска заједница све је строжа по питању потрошње финалне енергије у стамбеном сектору. Стога је отишла корак даље, и то промовисањем нових концепата енергетски ефикасних зграда: ниско енергетске зграде² (Abel, 1994), пасивне зграде³ (Altan et al., 2016), зграде нулте енергије⁴ (Voss et al., 2011), аутономне зграде⁵ (Ramanathan, 2021) и зграде са вишком енергије⁶ (Firląg, 2019). Поменути концепти се све више преливају и на Србију, па су постојеће традиционалне зграде, како време одмиче, у све неповољнијој позицији (Bojić et al., 2011; Matić et al., 2016; Lukić et al., 2020; Nešović et al., 2023).

Биоклиматско-пасивни приступ у зградарству, базиран на промовисању земуница⁷ – зграда прекривених

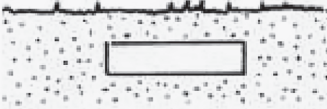
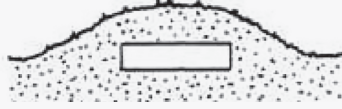
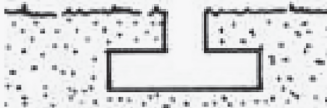

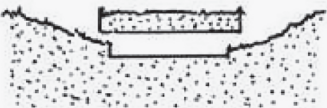

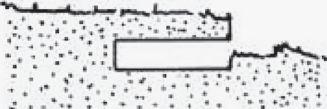
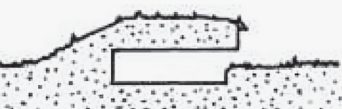
земљиштем, делимично или потпуно, одавно је присутан у светским научним круговима (Akubue, 2021; Roy, 2006). Због тога што поспешују коришћење параметара локације, како природних (ветар, соларно зрачење, вегетација, конфигурација терена итд.), тако и створених (положај зграде, облик зграде, оријентација зграде, растојање између суседних зграда итд.), ове зграде, које према основној класификацији могу бити природне и вештачке (Таб. 1), у комбинацији са енергетски ефикасним термотехничким системима, поседују велики потенцијал да достигну статус (поменутих) нових енергетски ефикасних зграда. Због тога су исте биле предмет истраживања многих иностраних радова, студија и пројеката.

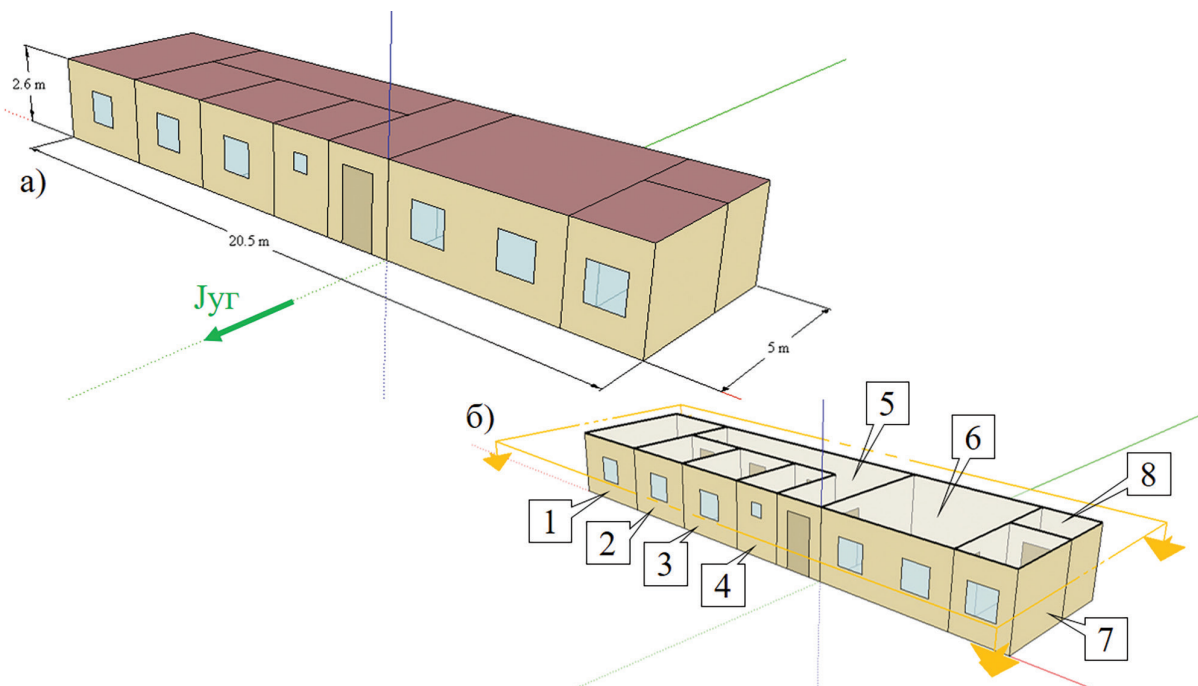
Анселм је у прегледном раду, између осталог, изнео теоријске основе историјског, типолошког и структурног значаја земуница (Anselm, 2012). Такође се осврнуо и на енергетске и одрживе аспекте земуница у савременој архитектури. Резултати истраживања Ван Дронкелара и др. показали су да земунице изискују знатно мање износе енергије за грејање и хлађење у поређењу са класичним надземним стамбеним зградама (Van Dronkelaar et al., 2014). Зхао и др. су нумерички истражили термичко понашање пећинских зграда на стрмим теренима

(поред пода на тлу) у непосредном контакту са земљиштем (Alkaff et al., 2016; Hassan, Sumiyoshi, 2018), односно зграде са најмање 50% термичког омотача у непосредном контакту са земљиштем (Milanović, 2016).

- 2 енгл. Low Energy Buildings
- 3 енгл. Passive Buildings
- 4 енгл. Zero Energy Buildings
- 5 енгл. Autonomous Buildings
- 6 енгл. Plus Energy Buildings
- 7 Земунице су зграде са барем још једном страном термичког омотача

Таб. 1. Типови земуница (Labs, 1975) / Tab. 1 Earth-sheltered buildings types (Labs, 1975)

| Типови земуница | Конфигурација терена | |
|--|---|---|
| | Природне | Вештачке |
| Потпуно укопане (енгл. Buried Earth-Sheltered Building) |  |  |
| Отворене (енгл. Opened Earth-Sheltered Buildings) |  |  |
| Инфилтриране (енгл. Infiltrated Earth-Sheltered Buildings) |  |  |
| Елевационе (енгл. Elevational Earth-Sheltered Buildings) |  |  |



Сл. 1. Предмет нумеричког истраживања: а) Изометријски приказ; б) Распоред просторија (1) Спаваћа соба 1; (2) Спаваћа соба 2; (3) Спаваћа соба 3; (4) Купатило; (5) Ходник; (6) Дневна соба; (7) Кухиња; (8) Остава / Fig. 1 The subject of numerical investigation: a) Isometric view; b) Rooms layout (1) Bedroom 1; (2) Bedroom 2; (3) Bedroom 3; (4) Bathroom; (5) Hall; (6) Living room; (7) Kitchen; (8) Pantry

(ллицама) у хладном региону Кине користећи софтвер EnergyPlus (Zhao et al., 2016). Каљејас и др. су анализирали топлотно оптерећење у спаваћим собама земуница на локацијама са тропском климом (Callejas et al., 2020). У зависности од оријентације фасадног зида, топлотно оптерећење у спаваћим собама може бити редуковано 24–31%, уз задржавање жељених услова комфора. У студији спроведеној на територији Мајманда (Иран) анализирано је преко 20 земуница са циљем да се кроз њихову геометријску и просторну оптимизацију побољшају услови комфора (Khaksar et al., 2022). Генерални закључак је да се пажљивим архитектонским дизајном услови живота у земуницама могу побољшати за преко 30%.

За разлику од светске, домаћа литература је знатно скромнија истраживањима зграда прекривених (насутих) земљиштем. Спасојевић-Санитић и Станојловић су показали да је концепт земуница пример одрживог квалитета живота који треба следити (Spasojević-Santić, Stanojlović, 2016). Крстић и остали показују да су земунице архитектонски концепт који поседује велики енергетски потенцијал (Krstić et al., 2018). Кроз неколико научних радова, Милановић је истражио архитектонске и грађевинске аспекте земуница (Milanović, 2016; Milanović, Folić, 2017; Milanovic et al., 2018), док су енергетски аспекти и потенцијали земуница и нумерички истражени (Lukić et al., 2019; Nešović et al., 2019; Nešović et al., 2023).

Занемарљиво присуство земуница у традиционалној, али и савременој, архитектури на подручју Републике

Србије има историјску, културолошку, климатску и типолошку позадину. Иако је термичка удобност позитивно оцењена, високи инвестициони трошкови, проблеми са влагом, звучним и визуелним ефектима, итд., у прошлости су створили још једну негативну подлогу – структурну. Данашња (тренутна) класификација објеката и не препознаје земунице као засебну категорију (Službeni glasnik RS, 2015). Исто важи и за друге правне акте, попут оних који се тичу енергетске ефикасности.

Због свега наведеног, у овом раду истражују се различити типови земуница (4 инфилтриране и 1 елевациона). Скретање пажње стручној јавности на енергетски значај зграда прекривених земљиштем на територији Србије, са циљем да се испрате водећи светски трендови када је потрошња финалне енергије у стамбеном сектору у питању, главни је мотив овог истраживања. Потрошња финалне (електричне) енергије за потребе грејања током седмомесечног периода (од 1. октобра до 30. априла), у свим разрађеним сценаријима, анализирана је нумерички, уз употребу софтвера EnergyPlus. Термичке перформансе поменутих зграда (њих 5) истовремено су упоређене са класичном надземном зградом, истих геометријских, грађевинских и термотехничких перформанси. Иако је нумеричко истраживање у овом конкретном случају спроведено за подручје града Крагујевца, иста методологија може бити имплементирана и за било које друго територијално подручје у Републици Србији.

| Редни број | Назив | Ознака | А [m ²] |
|------------|----------------|--------|---------------------|
| 1 | Спаваћа соба 1 | СС1 | 17,5 |
| 2 | Спаваћа соба 2 | СС2 | 9 |
| 3 | Спаваћа соба 3 | СС3 | 9 |
| 4 | Купатило | КУП | 6 |
| 5 | Ходник | ХОД | 26 |
| 6 | Дневна соба | ДС | 25 |
| 7 | Кухиња | КУХ | 6 |
| 8 | Остава | ОСТ | 4 |

Таб. 2. Нето површина пода на тлу просторија у анализираној згради / Tab. 2 Net area of the floor of rooms in the analyzed building

| Грађевински елемент | Ознака | Север | Исток | Запад | Југ | Под на тлу/ Плафон (Кров) | Сума |
|---------------------|--------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|--------|
| Спољашњи зид | СЗ | 53,3 | 13 | 13 | 44,95 | - | 124,25 |
| Прозор | ПР | - | - | - | 6,25 | - | 6,25 |
| Врата | ВР | - | - | - | 2,1 | - | 2,1 |
| Под на тлу | ПНТ | - | - | - | - | 102,5 | 102,5 |
| Плафон (кров) | КР | - | - | - | - | 102,5 | 102,5 |
| Сума | - | 53,3 | 13 | 13 | 53,3 | 205 | 337,6 |

Таб. 3. Нето површина термичког омотача изражена у [m²] / Tab. 3 Net area of the thermal envelope expressed in [m²]

2.0 МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ

2.1 Грађевинска физика почетног модела

Комплетно нумеричко истраживање извршено је на конкретном моделу зграде (Сл. 1а, 1б) лоциране на подручју града Крагујевца. Укупна нето површина пода на тлу је 102,5 m² (Таб. 2). Нето површина пода на тлу грејаног простора је 98,5 m² (остава се у термичком смислу не третира). Зграда је намењена сталном боравку четворочлане породице.

Укупна површина термичког омотача је 337,6 m² (Таб. 3). Фактор облика износи 1,27. Сви транспарентни елементи (прозори и врата) постављени су на јужној страни (Сл. 1а, Таб. 3).

Почетни симулациони модел (Сл. 1) формиран је у складу са националним прописима о енергетској ефикасности у зградарству (Службени гласник РС, 2011). Другим речима, коефицијент пролаза топлоте за сваки грађевински елемент (Таб. 4) налази се у дозвољеним границама, тј. испод максимално дозвољених U вредности.

2.2 Метеоролошки подаци за град Крагујевац

Крагујевац (44,02° северне географске ширине и 20,92° источне географске дужине) је град у централном делу Србије, стотинак километара јужно од Београда. Крагујевац (са временском зоном +1 h) налази се на обали реке Лепенице и надморској висини од 209 m. Клима је умерено

континентална, са израженим годишњим добима (Таб. 5). Лета су топла и влажна, са температурама до 37°C. Зиме су хладне (до -12°C) и са снегом (EnergyPlus weather file, 2012).

Допунска легенда (важи за Таб. 5): $t_{\text{ваз}}$ [°C] просечна месечна температура ваздуха мерена сувим термометром, $I_{\text{дио}}$ [W/m²] просечна месечна вредност интензитета дифузног соларног зрачења на хоризонталну површину, $I_{\text{дир}}$ [W/m²] просечна месечна вредност интензитета директног соларног зрачења на хоризонталну површину, w [°] просечна месечна вредност нападног угла ветра ($w=0^\circ$ за северни ветар, $w=90^\circ$ за источни ветар, $w=180^\circ$ за јужни ветар и $w=270^\circ$ за западни ветар), v [m/s] просечна месечна брзина ветра и KP [mm] укупна месечна количина падавина.

2.3 Топлотна пумпа земља-вода

Да би се обезбедио топлотни комфор током анализираног периода⁸ (од 1. октобра до 30. априла), зграда (Сл. 1) је опремљена топлотном пумпом земља-вода типа REHAU GEO 7 (Сл. 2).

Топлотна пумпа са спољашње стране спрегнута је вертикалним геотермалним сондама (примарни циркулациони круг). Просторијама се топлотна енергија, у секундарном циркулационом кругу, испоручује путем

⁸ Грејна сезона у Републици Србији траје од 15. октобра до 15. априла. За потребе ове студије, усвојен је шири временски опсег, са циљем да се скрене пажња да се и у прелазним периодима могу јавити додатне потребе за грејањем, односно хлађењем, у складу са временским приликама.

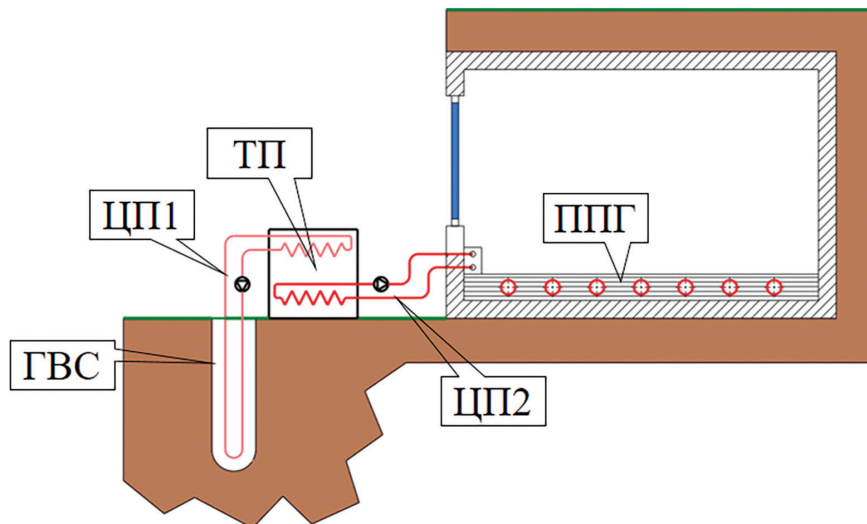
| Конструкција | Материјал | d [m] | k [W/mK] | ρ [kg/m ³] | c_p [J/kgK] | U [W/m ² K] |
|---------------|--------------------|----------------------------|----------|-----------------------------|---------------|------------------------|
| Спољашњи зид | Хидроизолација* | 0,002 | 0,19 | 1100 | 1460 | 0,3 |
| | Пуна цигла | 0,12 | 0,64 | 1600 | 920 | |
| | Стиропор | 0,1 | 0,041 | 20 | 1260 | |
| | Ваздушни слој | R=0,157 m ² K/W | | | | |
| | Шупљи блок 1 | 0,25 | 0,61 | 1400 | 920 | |
| | Кречни малтер | 0,025 | 0,81 | 1600 | 1050 | |
| Прозор | Стакло | | - | | | 1,5 |
| Врата | Боровина | 0,035 | 0,14 | 550 | 2090 | 1,6 |
| | Стиропор | 0,005 | 0,041 | 20 | 1260 | |
| | Боровина | 0,035 | 0,14 | 550 | 2090 | |
| Под на тлу | Камен | 0,25 | 1,16 | 2000 | 920 | 0,3 |
| | Шљунак | 0,05 | 0,81 | 1700 | 840 | |
| | Неармирани бетон 1 | 0,15 | 0,93 | 1800 | 960 | |
| | Армирани бетон | 0,04 | 2,04 | 2400 | 960 | |
| | Хидроизолација | 0,002 | 0,19 | 1100 | 1460 | |
| | Стиродур | 0,08 | 0,03 | 33 | 1260 | |
| | Неармирани бетон 1 | 0,15 | 0,93 | 1800 | 960 | |
| | Цементна кошуљица | 0,04 | 1,4 | 2100 | 1050 | |
| | Керамичке плочице | 0,015 | 0,87 | 1700 | 920 | |
| Плафон (кров) | Шљунак | 0,05 | 0,81 | 1700 | 840 | 0,15 |
| | Хидроизолација | 0,002 | 0,19 | 1100 | 1460 | |
| | Парна брана | 0,002 | 0,19 | 900 | 960 | |
| | Памук | 0,24 | 0,04 | 20 | 840 | |
| | Парна брана | 0,002 | 0,19 | 900 | 960 | |
| | Неармирани бетон 2 | 0,05 | 0,52 | 1200 | 920 | |
| | Цементна кошуљица | 0,04 | 1,4 | 2100 | 1050 | |
| | Шупљи блок 2 | 0,16 | 0,6 | 1200 | 920 | |
| Кречни малтер | 0,025 | 0,81 | 1600 | 1050 | | |

Таб. 4 Термичке карактеристике грађевинских материјала и конструкција / Tab. 4 – Thermal characteristics of building materials and constructions
* Не важи за почетни симулациони модел (поглавље 3.1).

Таб. 5. Метеоролошки подаци за Крагујевац / Tab. 5 Meteorological data for Kragujevac

| Месец | T _{ваз} [°C] | I _{дано} [W/m ²] | I _{дир} [W/m ²] | w [°] | u [m/s] | KP [mm] |
|-------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------|---------|---------|
| I | -0,24 | 33,30 | 63,63 | 213,17 | 2,1 | 17,2 |
| II | 0,88 | 49,39 | 86,66 | 210,6 | 2,02 | 20,1 |
| III | 5,57 | 77,08 | 106,12 | 207,98 | 2,35 | 26 |
| IV | 10,87 | 92,65 | 149,02 | 209,06 | 2,27 | 63,7 |
| V | 16,06 | 113,30 | 176,45 | 210,08 | 1,77 | 38,6 |
| VI | 18,85 | 109,50 | 208,94 | 209,51 | 1,69 | 57,2 |
| VII | 20,78 | 110,60 | 228,12 | 198,04 | 1,62 | 99,5 |
| VIII | 20,38 | 96,25 | 215,40 | 211,45 | 1,51 | 83,8 |
| IX | 16,68 | 75,54 | 166,92 | 203,79 | 1,68 | 95,8 |
| X | 11,18 | 57,34 | 119,43 | 222,28 | 1,69 | 65,5 |
| XI | 6,08 | 39,83 | 64,51 | 210,38 | 2,06 | 31,5 |
| XII | 1,13 | 28,66 | 58,86 | 208,33 | 1,87 | 39,4 |

Сл. 2. Шема рада топлотне пумпе земља-вода; ТП – Топлотна пумпа земља-вода; ГВС – Геотермална вертикална сонда; ЦП1 – Циркулациона пумпа 1; ЦП2 – Циркулациона пумпа 2; ППГ – Подни панелни грејач / Fig. 2 – Operation scheme of the ground source heat pump; GSHP – Ground source heat pump; GVP – Geothermal vertical probe; CP1 – Circulation pump 1; CP2 – Circulation pump 2; FPH – Floor panel heater



подних панелних грејача (Cvetković, Nešović, 2021). Топлотна пумпа одржава жељене температуре у грејаним просторијама (20°C) захваљујући режиму рада који се заснива на варијабилном протоку. Техничке карактеристике топлотне пумпе и геотермалних вертикалних сонди приказане су у Таб. 6.

2.4 Google SketchUp софтвер

Софтвер Google SketchUp намењен је 3D моделирању. Поседује алате за основно и напредно 3D уређивање (брже и једноставније у односу на друге CAD софтвере), могућност рада са сценама, подршку за стилове, брзо креирање тродимензионалног текста, интеграцију са сервисом Google Earth, могућност рада са готовим 3D моделима итд. У овом случају коришћена је верзија Google SketchUp 8.

2.5 EnergyPlus софтвер

Софтвер EnergyPlus је користан алат за нумеричка истраживања енергетских токова у згради и њеног

утицаја на животну средину. Наиме, EnergyPlus састоји се од великог броја интегрисаних математичких модела, који, у комбинацији са одговарајућим временским датотекама, симулирају рад различитих термотехничких система: грејања, хлађења, климатизације, вентилације, електричних уређаја, водовода и канализације, присуства људи, вештачке расвете итд. Верзија коришћена за потребе овог рада је EnergyPlus 7.2.

3.0 НУМЕРИЧКЕ АНАЛИЗЕ

3.1 Симулациони сценарио

У првом симулационом сценарију (сценарио С1) креиран је модел зграде који једино преко пода на тлу (102,5 m²) остварује „комуникацију“ са земљиштем (Сл. 3а, Таб. 7). Зграда из сценарија С1 је класичан надземни једносратни грађевински објекат, тј. почетни модел, у односу на који се поред различитих типова земалица (сценарија С2-С6).

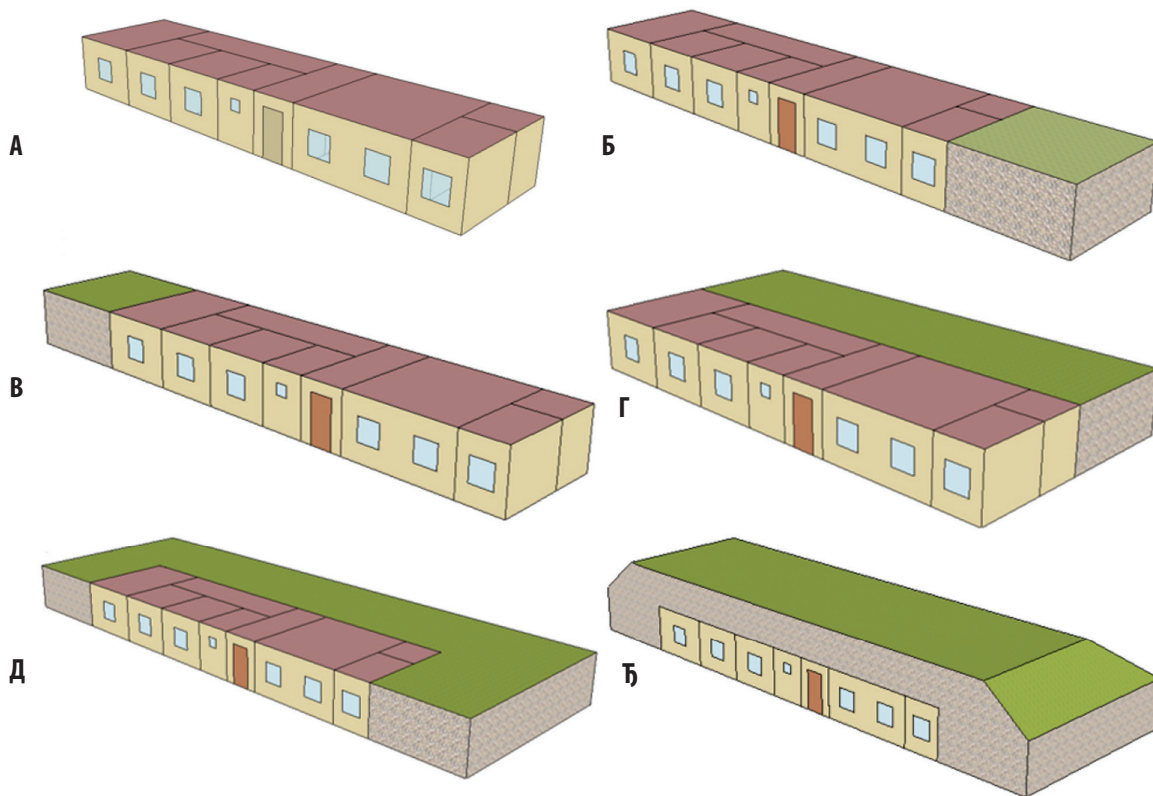
Таб. 6. Техничке карактеристике топлотне пумпе земља-вода и геотермалних вертикалних сонди / Tab. 6 Technical parameters of the ground source heat pump and geothermal vertical probes

| Топлотна пумпа земља-вода | |
|-----------------------------------|----------|
| Параметар | Вредност |
| Номинална снага кондензатора [W] | 7300 |
| Коефицијент перформанси [-] | 4,56 |
| Номинална снага компресора [W] | 1600 |
| Максимална радна температура [°C] | 55 |
| Максимални радни притисак [bar] | 3 |
| Геотермалне вертикалне сонде | |
| Параметар | Вредност |
| Номинална снага свих сонди [W] | 5700 |
| Број сонди [-] | 2 |
| Дубина сонди [m] | 73,2 |
| Полупречник сонди [m] | 0,0889 |

У сценаријима С2-С4, почетни модел зграде се насипа, тако да се, поред пода на тлу, још један грађевински елемент налази у директном додиру са земљиштем (Таб. 7): С2 (источни спољашњи, тј. фасадни зид, Сл. 3б), С3 (западни зид, Сл. 3в), С3 (северни зид, Сл. 3г). Површине, сада зидова у тлу, у случајевима С2 и С3 су идентичне (по 13 m²). У сценарију С4, она је већа за 40,3 m² (53,3 m²). Укупне површине свих грађевинских елемената у непосредном контакту са земљиштем, у сценаријима С2-С4, су (Таб. 7): 115,5 m², 115,5 m² и 155,8 m², респективно. Због тога што још

један део термичког омотача (спољашњи зид) учествује у спољашњој топлотној размени са земљаним насипом, зграде из сценарија С2-С4 припадају групи инфилтрираних земуница.

Још једна инфилтрирана земуница разматрана је у симулационом сценарију С5. У питању је грађевински објекат чији су сви (сем јужне фасаде) спољашњи зидови насути слојем земљишта (Сл. 3д, Таб. 7). Укупна површина термичког омотача у додиру са земљиштем (под на тлу, источни, западни и северни зид) сада је 181,8 m².



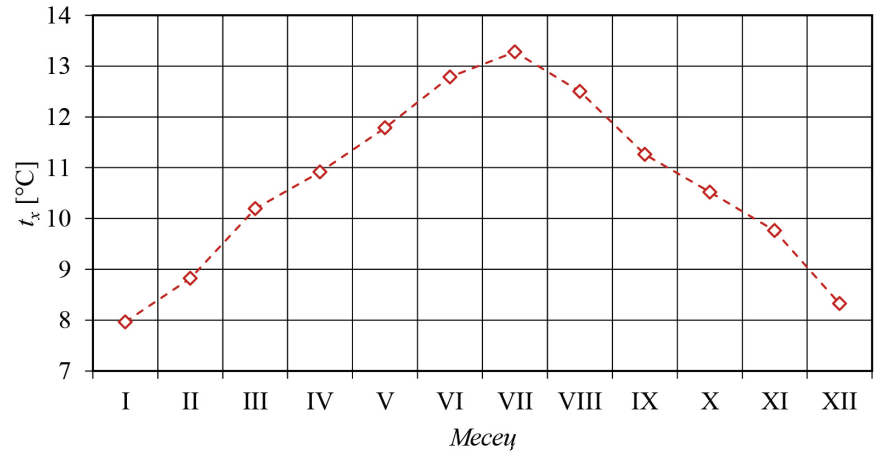
Сл. 3 – Сценарио симулација: а) Класична надземна зграда (С1); б) Земљани насип са источне стране (С2); в) Земљани насип са западне стране (С3); г) Земљани насип са северне стране (С4); д) Земљани насип са источне, северне и западне стране (С5); ђ) Земљани насип са свих страна (С6)/ Fig. 3 – Scenario simulation a) Classic above-ground building (S1); b) Soil layer on the eastern side (S2); c) Soil layer on the western side (S3); d) Soil layer on the north side (S4); e) Soil layer on the eastern, northern, and western sides (S5); f) Soil layer on all sides (S6)

Таб. 7 – Анализирани случајеви / Tab. 7 – Analyzed cases

* Индексна ознака односи се на оријентацију спољашњег зида у контакту са земљиштем.

| Сценарио симулација | Грађевински елемент у контакту са земљиштем | | | | Тип земунице |
|---------------------|---|---|--|---------------------|--------------|
| | Број | Назив | Ознака* | А [m ²] | |
| С1 | 1 | Под на тлу | ПНТ | 102,5 | - |
| С2 | 2 | Под на тлу Спољашњи зид | ПНТ+С _И | 115,5 | Инфилтрирана |
| С3 | | | ПНТ+С _З | | |
| С4 | | | ПНТ+С _С | | |
| С5 | 4 | | ПНТ+С _И +С _З +С _С | 181,8 | |
| С6 | 5 | Под на тлу Спољашњи зид Плафон (Кров) | ПНТ+С _И +С _З +С _С +КР | 284,3 | Елевациона |

Сл. 4. Просечна месечна температура земљишта за Крагујевац ($x=2$ m)/ Fig. 4 – Average monthly soil temperature for Kragujevac ($x=2$ m)



Последњи анализирани концепт је елевациони тип земунице (Сл. 3ђ, Таб. 7). Ова земуница (ПНТ+СЗ_М+СЗ₃+СЗ_С+КР) има само један слободан грађевински елемент (јужни фасадни зид), стога и највећу контактну површину са земљиштем (284,3 m²).

3.2 Температура земљишта

За потребе овог рада, усвојено је да се плафон, тј. кров земунице, налази на дубини од 2 m од слободне површине земљишта (сценарио С6). Температура земљишта на овој дубини (Сл. 4), према Ван Дронкелару, може се одредити применом следећег обрасца (Јед. 1):

$$t_x = t_M - t_A e^{-x \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos\left(\frac{2\pi}{365}\left(\tau - \tau_0 - \frac{x}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right)\right)$$

где су: t_x [°C] просечна дневна температура земљишта током године на дубини x , t_M [°C] просечна годишња температура слободне површине земљишта ($x=0$ m), x [m] вертикално растојање плафона (крова) земунице од слободне површине земљишта, τ [-] дан у години, τ_0 [-] фазна константа која одговара дану минималне површинске температуре, α [m²/s] топлотна дифузивност

земљишта и t_A [°C] температурна амплитуда слободне површине земљишта.

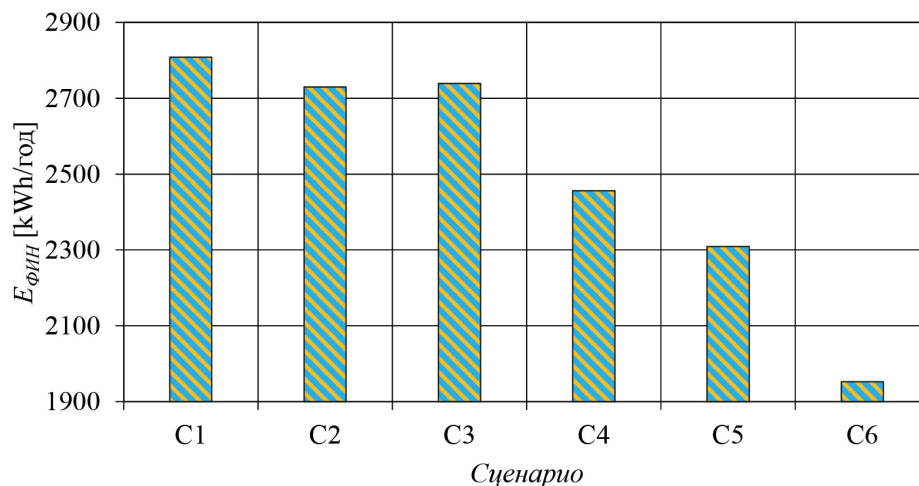
На основу представљене једначине и препоруке (Serbian Environmental Protection Agency, 2023) за вредност $\alpha=0,91$ m²/s (иловача/смоница), одређене су просечне месечне температуре земљишта на дубини од 2 m за подручје града Крагујеваца (Сл. 4). Дијаграм на Сл. 4 коришћен је у свим анализираним случајевима (у складу са Сл. 3).

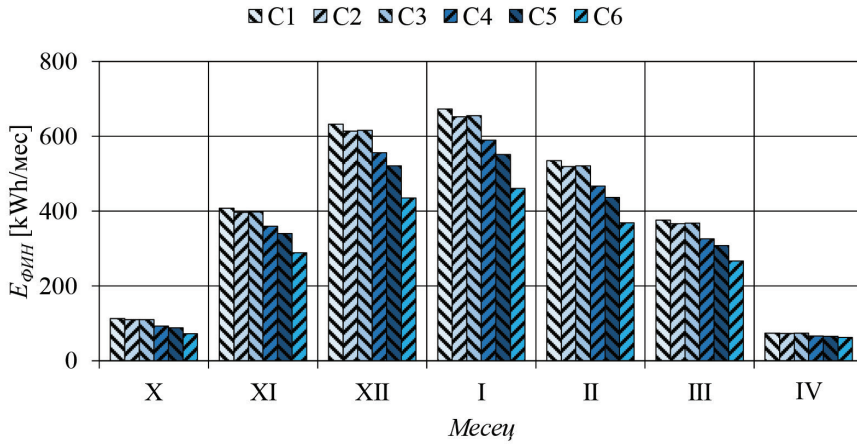
Битно је напоменути да Јед. 1 не узима у обзир падавине и хетерогеност у својствима земљишта на различитим локацијама и дубинама. Топлотна дифузивност земљишта заснива се на претходном познавању густине, топлотне проводљивости и специфичног топлотног капацитета земљишта. Другим речима, топлотна дифузивност зависи од врсте земљишта и разликује се од локације градње.

4.0 РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

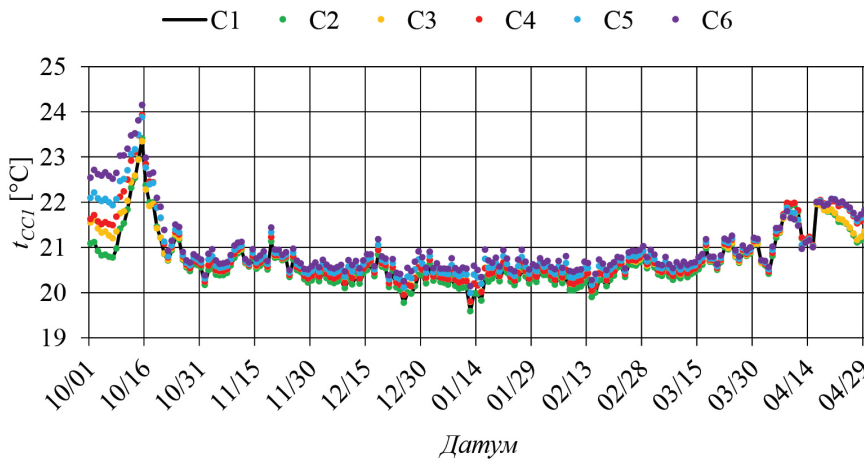
На наредном дијаграму (Сл. 5) приказана је потрошња финалне (електричне) енергије, током анализираних периода (од 1. октобра до 30. априла), за различите концепте инфилтрираних (сценарио С2-С5) земуница, односно за елевациону (сценарио С6) земуницу. На истом дијаграму

Сл. 5. Потрошња финалне (електричне) енергије током анализираних периода у различитим типовима подземних зграда (С2-С6) у односу на надземну зграду (С1)
Fig. 5 Final (electrical) energy consumption during the analyzed period in different underground building types (S2-S6) in relation to the above-ground building (S1)

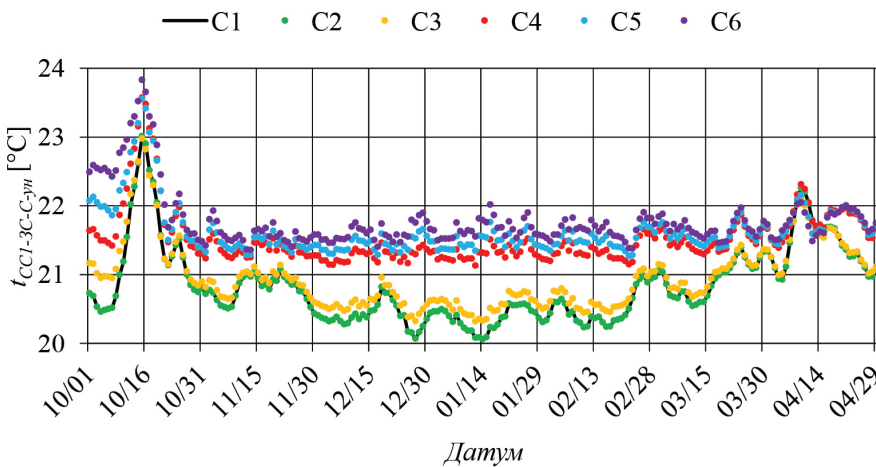




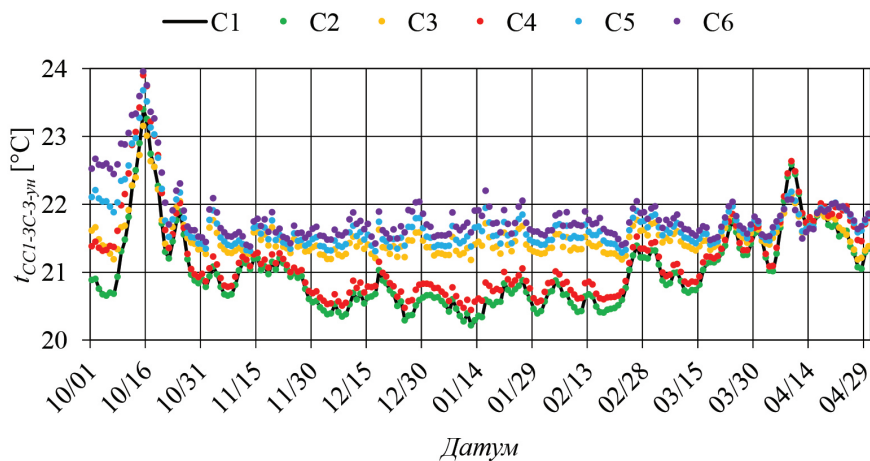
Сл. 6 – Месечна потрошња финалне (електричне) енергије током анализираног периода у различитим типовима подземних зграда (C2-C6) у односу на надземну зграду (C1)
 Fig. 6 – Monthly final (electrical) energy consumption during the analyzed period in different underground building types (S2-S6) in relation to the above-ground building (S1)



Сл. 7 – Просечна дневна температура у спаваћој соби 1 током анализираног периода у зависности од испитаног сценарија (C1-C6)
 Fig. 7 – Average daily temperature in bedroom 1 during the analyzed period depending on the scenario (S1-S6)



Сл. 8 – Просечна дневна температура северног спољашњег зида са унутрашње стране у спаваћој соби 1 током анализираног периода у зависности од испитаног сценарија (C1-C6)
 Fig. 8 – Average daily temperature of the north exterior wall on the inside of bedroom 1 during the analyzed period depending on the scenario (S1-S6)



Сл. 9 – Просечна дневна температура западног спољашњег зида са унутрашње стране у спаваћој соби 1 током анализираног периода у зависности од испитаног сценарија (C1-C6)
 Fig. 9 – Average daily temperature of the west exterior wall on the inside of bedroom 1 during the analyzed period, depending on the scenario (S1-S6)

(Сл. 5) приказана је и потрошња финалне (електричне) енергије у класичном надземном грађевинском објекту истих геометријских, грађевинских и термотехничких перформанси (сценарио С1), коме је, као што је већ речено, додељена контролна (поредбена) улога.

Као што се може видети на Сл. 5, у класичној, тј. надземној згради (сценарио С1), потрошња финалне енергије за грејање је највећа (2808,52 kWh/год). Потрошња финалне енергије нешто је мања у ПНТ+С₂ (сценарио С2) и ПНТ+С₃ (сценарио С2) земуницама: 2729,99 kWh/год и 2739,31 kWh/год, респективно. Незнатна предност С2 земунице над С3 земуницом (за 9,32 kWh/год) може се приписати постојању оставе (Сл. 1). Наиме, земљиште уз фасадни зид (случај С2) има улогу додатног изолационог слоја. Повећање отпора пролаза топлоте доводи до повишења амбијенталне температуре у негрејаним просторијама. Стога се из наведеног може закључити да се коришћењем земљишта, на индиректан начин, амбијенталне температуре негрејаних просторија приближавају температурама грејаних просторија. У неким специфичним случајевима, ове температуре могу бити и скоро изједначене.

Бољи резултати у енергетском смислу (14,36% у односу на зграду у сценарију С1, Сл. 5) могу се постићи тек у С4 сценарију (2455,85 kWh/год), када у топлотној размени са земљиштем учествује цела северна фасада (површине 53,3 m²). Од свих типова инфилтрираних земуница (сценарио С2-С5), зграда из сценарија С5 има највећу контактну површину (181,8 m²), стога и најмање захтеве за топлотном енергијом (Сл. 5). Зато земуница С5 у односу на надземну зграду С1 захтева 21,64% (2308,93 kWh/год) мање финалне (електричне) енергије.

Најбољи резултати (1952,75 kWh/год) могу се очекивати максимизирањем контактне површине између зграде и земљишта (Сл. 5). То се не може постићи у случају инфилтрираних земуница. Овај услов испуњава само елевациона земуница (сценарио С6).

Месечна потрошња финалне (електричне) енергије од 1. октобра до 30. априла, у зависности од испитаног сценарија (С1-С6), приказана је на Сл. 6.

Током октобра, потрошња финалне енергије у анализираним зградама износила је (Сл. 6): 112,43 kWh/мес (С1), 109,76 kWh/мес (С2), 110,04 kWh/мес (С3), 92,59 kWh/мес (С4), 87,73 kWh/мес (С5) и 71,84 kWh/мес (С6).

Потрошња финалне енергије у новембру у истим зградама била је (Сл. 6): 407,22 kWh/мес (С1), 396,72 kWh/мес (С2), 397,88 kWh/мес (С3), 359,63 kWh/мес (С4), 339,97 kWh/мес (С5) и 288,91 kWh/мес (С6).

Децембар и јануар су два најхладнија месеца током године (Таб. 5, Сл. 4). Тада је месечна потрошња финалне (електричне) енергије највећа. Топлотни захтеви су ипак нешто релаксиранији у случају последњег месеца у години

(Сл. 6): 631,87 kWh/мес (С1), 613,27 kWh/мес (С2), 615,26 kWh/мес (С3), 555,98 kWh/мес (С4), 520,64 kWh/мес (С5) и 435,04 kWh/мес (С6).

Јануарска потрошња била је у свим анализираним случајевима највећа (Сл. 6): 672,56 kWh/мес (С1), 652,24 kWh/мес (С2), 654,73 kWh/мес (С3), 589,15 kWh/мес (С4), 550,7 kWh/мес (С5) и 460,04 kWh/мес (С6).

У фебруару, марту и априлу, спољашња температура ваздуха расте са сваким наредним месецом, па захтеви за топлотном енергијом пропорционално опадају. У фебруару су се кретали између 534,57 kWh/мес (С1) и 368,38 kWh/мес (С6), док су у марту они били између 376,09 kWh/мес (С1) и 266,28 kWh/мес (С6). У априлу је потрошња финалне енергије била најмања, тј. између 73,79 kWh/мес (С1) и 62,26 kWh/мес (С6).

Из наведеног се може закључити да се током топлијих месеци све анализираних зграде, у термичком смислу, понашају приближно исто, без обзира на величину контактне површине која се остварује између грађевинских елемената и земљишта (нпр. месец април, Сл. 6). Разлог су, првенствено, соларни топлотни добици, који највећим делом у сваку зону доспевају кроз транспарентне елементе. Топлотни добици, природним путем, без улагања енергије, подижу унутрашњу температуру (нпр. спаваћа соба 1, Сл. 7).

У зависности од интензитета соларног зрачења, унутрашња температура у просторији некада може прекорачити жељену вредност и за неколико степени (Сл. 7), тражећи додатно улагање енергије, овог пута расхладне, и то кроз ангажовање климатизационих система (уколико постоје у објекту).

Поред унутрашње температуре ваздуха, на услове комфора утицај има и температура спољашњих грађевинских елемената са унутрашње стране. На наредним сликама (Сл. 8, 9) приказане су просечне температуре северног, односно западног, зида са унутрашње стране, у спаваћој соби 1, током поменутог седмомесечног периода, за све анализираних случајеве.

Добро је познато да сва тела топлотну енергију размењују и путем зрачења. Такође је познато и да ови износи енергије зависе од температуре тела. Виша температура, у овом случају спољашњих преградних елемената (Сл. 8, 9) са унутрашње стране, смањује износе енергије које човек емитује ка њима. У таквим околностима, човек се осећа доста пријатније. Поменути ефекат доприноси и избегавању тачке росе, тј. кондензације водене паре на унутрашњим странама спољашњих грађевинских елемената, првенствено зидова и плафона (крова).

Често се у пракси могу наћи случајеви да се људи у неизолованим кућама не осећају комфорно у топлотном смислу, иако термостат показује жељену температуру ваздуха у просторији у којој се борави. Разлог је управо

ниска температура спољашњих грађевинских елемената са унутрашње стране, па људи у већим износима одају топлоту путем зрачења. У случају земуница, овај негативни ефекат се избегава.

5.0 ЗАКЉУЧАК

Овај рад бавио се енергетским аспектима коришћења разних типова земуница у савременој архитектури. Да би се спровеле жељене анализе, коришћен је симулациони софтвер EnergyPlus. Фокус је стављен на инфилтриране и елевационе земунице, јер се једино њихова евентуална будућа примена на територији Србије може сматрати оправданом у енергетском смислу.

На конкретном моделу једнопородичног стамбеног објекта (лоцираном на простору града Крагујевца) опремљеног геотермалним вертикалним сондама, топлотном пумпом земља-вода, подним панелним грејачима и одговарајућим циркулационим пумпама, анализирана је годишња потрошња финалне (електричне) енергије за грејање, и то у зависности од броја грађевинских елемената са земљаним насипом. Седмочесечни период (од 1. октобра до 30. априла) узет је у разматрање у овом раду, јер је, за поднебља са умерено-континенталном климом, овај временски домен врло осетљив у енергетском смислу.

Потрошња финалне (електричне) енергије у инфилтрираним и елевационим земуницама упоређена је са потрошњом финалне (електричне) енергије у класичном надземном објекту, истих геометријских, грађевинских и термотехничких перформанси. Резултати су показали да се годишња потрошња финалне енергије за грејање у елевационим земуницама може редуковати преко 40% (уз боље термичке услове), у односу на надземне зграде.

Иако земунице карактеришу виши почетни (инвестициони) трошкови, новчани добици током саме експлоатације оваквих објеката током времена компензују овај недостатак. Може се очекивати да се период повраћаја инвестиција у будућности скраћује, заједно са усавршавањем грађевинских материјала, који су и данас на завидном нивоу квалитета. Један од будућих правца истраживања земуница управо треба бити усмерен на детаљне техноекономске анализе и прорачуне који се односе на период повраћаја почетних инвестиција, а који би у обзир узели актуелне тржишне цене.

Савремени архитектонски и грађевински дизајн не би требало да заобилази овакве зграде, поготово ако се у обзир узму чињенице да је потрошња финалне енергије у стамбеном сектору Републике Србије и даље доста висока, да све већи број људи живи у градовима, да се сеоска насеља гасе, а пољопривредни сектор урушава. Већа имплементација земуница на тлу Републике Србије, на локацијама погодним за њихово постављање, усмерила би

државне органе да допуне одговарајуће правне и законске акте у области енергетске ефикасности у зградарству. Тиме би био направљен још један корак ка главном циљу – достизање одрживог развоја.

6.0 ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад представља резултате истраживања насталих у оквиру пројекта Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (број ТР33015). Захваљујем се Министарству на финансијској подршци током овог истраживања.

7.0 РЕФЕРЕНЦЕ

- Abel, E. 1994. Low-energy buildings. *Energy and Buildings*, 21, 169-174, [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(94\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0378-7788(94)90032-9).
- Akubue, J. 2021. Earth-sheltered housing; Design concepts for urban ground-scrappers. *International Journal of Architecture, Arts and Applications*, 7, 1-7, <https://doi.org/10.11648/j.ijaaa.20210701.11>.
- Alkaff, S. A., Sim, S. C., Efsan, M. E. 2016. A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 692-713, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.085>.
- Altan, H., Hajibandeh, M., Tabet Aoul, K. A., Deep, A. 2016. Passive design. *ZEMCH: Toward the delivery of zero energy mass custom homes*, -, 209-236, https://doi.org/10.1007/978-3-319-31967-4_8.
- Anselm, A. J. 2012. Earth shelters; A review of energy conservation properties in earth-sheltered housing. *Energy Conservation*, 31, 125-48, <http://dx.doi.org/10.5772/51873>.
- Bojić, M., Nikolić, N., Nikolić, D., Skerlić, J., Miletić, I. 2011. Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions. *Applied Energy*, 887, 2407-2419, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.011>.
- Callejas, I. J. A., Durante, L. C., Guarda, E. L. A. D., Apolonio, R. M. 2020. Thermal performance of partially bermed earth-sheltered house: Measure for adapting to climate change in a tropical climate region. *Proceedings (MDPI)*, 58, 1-13, <https://doi.org/10.3390/wef-06919>.
- Cvetković, D., Nešović, A. 2021. Impact of heat source at radiant electric heating panel. *Energy and Buildings*, 239, 110843, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110843>.
- EnergyPlus weather file, 2012.
- Firląg, S. 2019. Cost-optimal plus energy building in a cold climate. *Energies*, 12, 3841, <https://doi.org/10.3390/en12203841>.
- Hassan, H., Sumiyoshi, D. 2018. Earth-sheltered buildings in hot-arid climates: Design guidelines. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7, 397-406, <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.05.005>.
- Ionescu, C., Baracu, T., Vlad, G. E., Neclau, H., Badea, A. 2010. The historical evolution of the energy efficient buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 243-253, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.062>.
- Khaksar, A., Tabadkani, A., Shemirani, S. M. M., Hajirasouli, A., Banihashemi, S., Attia, S. 2022. Thermal comfort analysis of earth-sheltered buildings: The case of meymand village, Iran. *Frontiers of Architectural Research*, 11, 1214-1238, <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.04.008>.
- Krstić, H., Bogdanović, V., Vasov, M., Bogdanović-Protić, I., Đorđević, S. S. 2018. Buried buildings as an example of architecture that strives to be energy efficient. *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, 15, 403-413, <https://doi.org/10.2298/FUACE160921031K>.
- Labs, K. 1975. The Use of Earth Covered Buildings Through History. *Alternatives in Ener Conservation: The Use of Earth Covered Buildings*, -, 7-15.
- Lukić, N., Nešović, A., Grbović, F., Nikolić, N., Taranović, D. 2019. Location parameters and energy efficiency in buildings. *50th International Congress and Exhibition on Heating, Refrigeration and Air Conditioning*, Belgrade, Serbia, 2019, December 4th-6th, pp. 357-364, ISBN: 978-86-81505-99-1.
- Lukić, N., Nešović, A., Nikolić, N. 2020. Influence of exterior door opening on the heating consumption of a passive residential house. *Energy Efficiency*, 13, 1163-1176, <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09880-6>.
- Matić, D., Roset Calzada, J., Todorović, M. S. 2016. Renewable energy sources-integrated refurbishment approach for low-rise residential prefabricated building in Belgrade, Serbia. *Indoor and Built Environment*, 25, 1016-1023, <https://doi.org/10.1177/1420326X16660355>.

- Milanović, A. 2016. Razvoj podzemnih stambenih objekata i njihova savremena primena u Srbiji. Doktorska disertacija. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka.
- Milanović, A. R., Folić, N. K. 2017. Earth-sheltered housing buildings in the energy efficient structures context. *Građevinski Materijali i Konstrukcije*, 60, 47-60, <https://doi.org/10.5937/grmk1703047R>.
- Milanović, A. R., Folić, N. K., Folić, R. 2018. Earth-sheltered house: a case study of Dobraca village house near Kragujevac, Serbia. *Sustainability*, 10, 3629, <https://doi.org/10.3390/su10103629>.
- Nešović, A., Jurišević, N., Kowalik, R., Terzić, I. 2023. Potential of contemporary earth-sheltered buildings to achieve Plus Energy status in various European climates during the heating season. *Building Simulation*, -, -, <https://doi.org/10.1007/s12273-023-161-x>.
- Nešović, A., Šušteršič, V., Lukić, N., Nikolić, N., Terzić, I. 2019. Optimization of the free facade of the earth-sheltered houses in order to minimize the final energy consumption during the heating season. *14th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering (DEMI 2019)*, Banja Luka, B&H, RS, 2019, May 24th-25th, pp. 209-214, ISBN: 978-99938-39-85-9.
- ODYSSEE-MURE, Serbia, Energy profile, Energy efficiency trends and policies, 2021, Available at: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-trends-policies-profiles/serbia-country-profile-english.pdf> [Accessed: 8 October 2023].
- Ramanathan, G. 2021. Autonomous buildings. *8th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation*, Coimbra, Portugal, 2021, November 17th-18th, pp. 246-247, ISBN: 978-1-4503-9114-6.
- Roy, R. 2006. *The complete book of underground houses, How to build a low-cost home*. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers.
- Serbian Environmental Protection Agency, Danube Basin eSOTER soil database, 2015, Available at: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/esoter/Danube/Presentations/c%20-%20Serbia%20-%20Dragana%20Vidojevic%20-%20SOTER%20database%20Feb%202015.pdf> [Accessed: 15 July 2023].
- Službeni glasnik Republike Srbije, 61/2011, *Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada*.
- Službeni glasnik Republike Srbije, 69/2012, 44/2018 - dr. zakon i 111/2022, *Pravilnik o uslovima, sadržini i načinu izdavanja sertifikata o energetske svojstvima zgrada*.
- Službeni glasnik Republike Srbije, 22/2015, *Pravilnik o klasifikaciji objekata*.
- Službeni glasnik Republike Srbije, 12/2022, *Pravilnik o bližim uslovima za raspodelu i korišćenje sredstava za primenu mera energetske efikasnosti*.
- Spasojević-Šantić, T., Stanojlović, D. 2016. Earthship – A new habitat on Earth for quality life. *1st International Conference on Quality of Life*, Kragujevac, Serbia, 2016, June 09th-10th, pp. 123-126, ISBN: 978-86-6335-033-5.
- Van Dronkelaar, C., Cóstola, D., Mangkuto, R. A., Hensen, J. L. 2014. Heating and cooling energy demand in underground buildings: Potential for saving in various climates and functions. *Energy and Buildings*, 71, 129-136, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.004>.
- Voss, K., Musall, E., Lichtmeß, M. 2011. From low-energy to net zero-energy buildings: status and perspectives. *Journal of Green building*, 6, 46-57, <https://doi.org/10.3992/jgb.6.1.46>.
- Zhao, J. W., Peng, F. L., Wang, T. Q., Zhang, X. Y., Jiang, B. N. 2016. Advances in master planning of urban underground space (UUS) in China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 290-307, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.011>.