

Energo koncept *Yaodong* podzemnih zgrada u XXI veku na teritoriji Srbije

Energy Concept of *Yaodong* Underground Buildings in the XXI Century on the Territory of Serbia

Aleksandar Nešović*, Danijela Nikolić*, Nebojša Lukić*

*University of Kragujevac, Faculty of Engineering, Serbia

Rezime – Zbog svog zanimljivog arhitektonskog rešenja, podzemne zgrade *Yaodong* kao da nude balans između prirodnih i stvorenih parametara lokacije (s jedne strane) i ambijentalnog komfora (s druge strane). U prvom delu rada definisan je koncept *Yaodong* (vreme nastanka, geografsko poreklo, kategorizacija, prostorna organizacija enterijera, geometrijske karakteristike, itd.). U drugom delu, autori predstavljaju konkretan model podzemne konstrukcije *Yaodong* koristeći softver *Google SketchUp*. Zatim vrše simulaciju potrošnje finalne i primarne energije u zgradi koristeći *EnergyPlus* softver i vremensku datoteku za grad Kragujevac. Iako je ovaj tip gradnje karakterističan za severozapadnu Kinu, autori su mišljenja da pomenuti građevinski dizajn može biti i od nacionalnog značaja, pogotovo kada se u obzir uzme činjenica da je potrošnja finalne (i primarne) energije poslednjih godina na svom vrhuncu, što, između ostalog, važi i za stambeni sektor.

Cljučne reči – Energija, *EnergyPlus*, Podzemna zgrada, Simulacija, *Yaodong* koncept.

Abstract – Due to their interesting architectural solution, *Yaodong* underground buildings seem to offer a balance between the natural and created parameters of the locations (on the one side) and ambient comfort (on the other side). In the first part of the paper, the *Yaodong* concept is defined (time of creation, geographical origin, categorization, the spatial organization of the interior, geometrical characteristics, etc.). In the second part of the work, the Authors develop a concrete model (in the *Google SketchUp* software) of the traditional *Yaodong* underground building, and then simulate (in the *EnergyPlus* software) the consumption of final and primary energy in the same, while using a weather file for the city of Kragujevac. Although this type of construction is characteristic of north-western China, the authors think that the mentioned construction design can be of national importance, especially when taking into account the fact that the consumption of final (and primary) energy of the last year at its peak, which also applies to the residential sector.

Index Terms – Energy, *EnergyPlus*, Underground building, Simulation, *Yaodong* concept.

I *YAODONG* ARHITEKTONSKI KONCEPT

Yaodong arhitektonski koncept nastao je pre više od 6000 godina u severozapadnom delu Kine [1], na visoravni Les¹ (Slika 1). Oštri klimatski uslovi (sa toplim letima i hladnim i suvim zimama [2]) u kombinaciji sa specifičnom konfiguracijom terena, primorali su tadašnje stanovnike da razviju podzemni sistem gradnje stambenih objekata, koji se održao i do danas, sa preko 40 miliona korisnika [3].



Slika 1. Visoravan Les na severozapadu Kine [4]

Yaodong podzemni² sistem gradnje bazira se, ili na ukopavanju stambenih objekata u stenama (litičasti predeli, Slika 2), ili na ukopavanju stambenih objekata u terenu (ravničarski predeli, Slika 3) [5].



Slika 2. *Yaodong* podzemne zgrade ukopane u stenama [6]

¹ Provincije Ningsja, Šensi, Šansi, Gansu i Unutrašnja Mongolija.

² U bukvalnom prevodu, *Yaodong* znači zgrada-pećina.

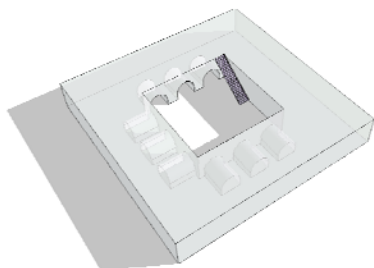


Slika 3. *Yaodong* podzemne zgrade ukopane u terenima [7]

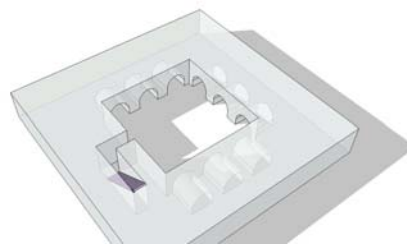
Yaodong podzemne zgrade prvog tipa (Slika 2) prvobitno su koristile kamene litice (spoljašnji, tj. primarni građevinski materijal) u kombinaciji sa drvenim ramovima (unutrašnji, sekundarni građevinski materijal). Prostorije su bile zasvođene, a zidovi sa unutrašnje strane obloženi glinom. Otvori (izrađeni od drveta) na južnoj strani bili su lučnog oblika [8-10]. *Yaodong* podzemne zgrade drugog tipa (Slika 3) sastoje se od centralnog podzemnog dvorišta (vertikalno iskopanog na ravničarskom terenu) i većeg broja zasvođenih prostorija (pećinskog tipa) u koje se ulazi iz centralnog dvorišta. To znači da su sve prostorije pod zemljom, tj. ispod nulte kote u ravni ravničarskog terena. Centralno dvorište u osnovi obično ima pravougaoni ili kvadratni oblik. Prostorije za boravak ljudi orijentisane su lučnim otvorima ka jugu (na severnoj strani dvorišta). Lučni otvori pomoćnih prostorija (skladišta, ostave, prostorije za držanje živine, i sl.) raspoređeni su na preostalim (istočnim, zapadnim i južnim) stranama centralnog dvorišta [8-10]. Namena svake *Yaodong* zgrade (Slika 1, Slika 2) je ista [8-11]: zaštita od vremenskih prilika i neprijatelja, optimizacija ambijentalnog komfora (manja potrošnja energije za grejanje zimi, odnosno za klimatizaciju ljeti), minimiziranje dodatnog ulaganja energije, vremena i materijala (u fazi izrade i eksploatacije objekata), maksimiziranje korišćenja prirodnih (Sunce, vetar, zelenilo i zemljište) i stvorenih (položaj, oblik i orijentacija zgrade i stvorena mikroklima) parametara lokacije, itd. Zbog niza navedenih pozitivnih karakteristika, koncept *Yaodong*, kroz popularizaciju i širu implementaciju, mogao bi da bude dodatno sredstvo za prevazilaženje energetske tranzicije [12, 13] u cilju dostizanja održivih razvoja [14], kako na nacionalnim, tako i na globalnim nivoima.

II YAODONG ARHITEKTONSKI DIZAJN

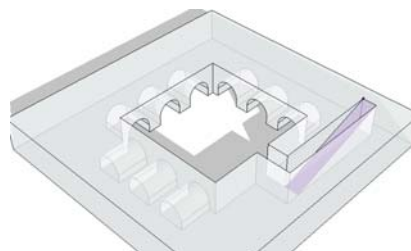
I među *Yaodong* podzemnim zgradama ukopanim u terenima postoje razlike. One se prvenstveno zasnivaju na pristupnim rešenjima centralnom podzemnom dvorištu (Slika 4-8).



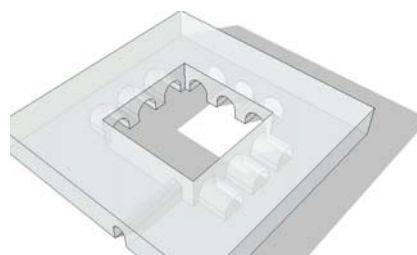
Slika 4. *Yaodong* podzemna zgrada ukopana u terenu sa unutrašnjim pristupnim stepeništem [10, 11]



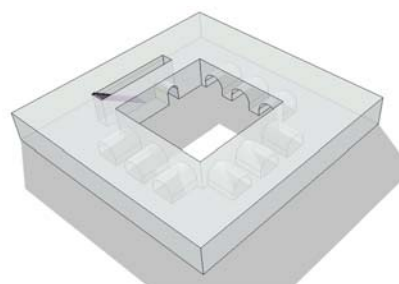
Slika 5. *Yaodong* podzemna zgrada ukopana u terenu sa spoljašnjim pristupnim stepeništem [10, 11]



Slika 6. *Yaodong* podzemna zgrada ukopana u terenu sa spoljašnjom pristupnom kosinom [10, 11]



Slika 7. *Yaodong* podzemna zgrada ukopana u terenu sa tunelskim pristupom [10, 11]

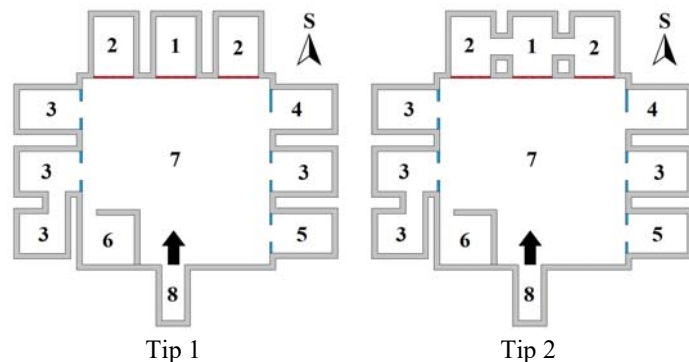


Slika 8. *Yaodong* podzemna zgrada ukopana u terenu sa kombinovanim (tunel sa spoljašnjim stepeništem/spoljašnjom kosinom) pristupom [10, 11]

Unutrašnja prostorna organizacija *Yaodong* podzemne zgrade ukopane u terenu može se videti na narednim slikama (Slika 9, Slika 10).

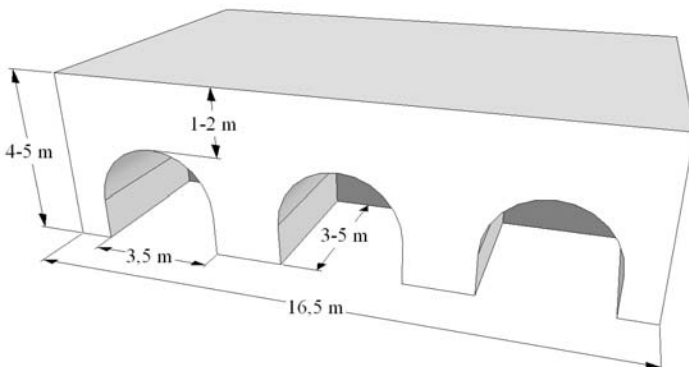
Dimenzije centralnog podzemnog dvorišta zavise od broja prostorija, tj. od broja članova domaćinstva. Prostorije na severnoj strani dvorišta međusobno mogu biti fizički odvojene (Slika 9, Tip 1), ili spojene uskim lučnim prolazima (Slika 9, Tip 2). Upotreba zastakljenja na otvorima pomenutih prostorija (prostorije namenjene ljudima) je obavezna. Za fizičko odvajanje

preostalih prostorija (pomoćne prostorije, svinjac, živinarnik, toalet) od centralnog dvorišta uglavnom se koriste paravani [10].



Slika 9. Osnova *Yaodong* podzemne zgrade ukopane u terenu sa rasporedom prostorija [10, 11]

1 – dnevna soba, 2 – spavaća soba, 3 – pomoćna prostorija (kuhinja, ostava, ...), 4 – svinjac, 5 – živinarnik, 6 – toalet, 7 – centralno podzemno dvorište, 8 – ulaz



Slika 10. Izgled fasade *Yaodong* podzemne zgrade ukopane u terenu na severnoj strani centralnog podzemnog dvorišta (prostorije namenjene boravku ljudi) [10, 15]

Širina prostorija uglavnom je 3,5 m, visina do 3 m, a dubina od 3-5 m. Veća dubina prostorija negativno bi uticala na nivo dnevnog osvetljenja, ali i na toplotne dobitke u zimskom periodu. Gornja tačka prostorije je od nulte kote udaljenja 1-2 m, ali rastojanje može da bude i veće (Slika 10) [10, 15].

III ENERGYPLUS MODEL

U ovoj numeričkoj studiji, fokus se stavlja na analizu potrošnje finalne i primarne energije za grejanje³ *Yaodong* podzemne zgrade (lociranoj na teritoriji grada Kragujevca, Tabela 1 [16]) tokom grejnog perioda (od 15. oktobra do 15. aprila), što znači da se u obzir uzimaju samo prostorije u kojima borave ljudi – prostorije na severnoj strani centralnog podzemnog dvorišta, otvorima okrenute ka jugu (Slika 9, prostorije 1 i 2). Uzimajući u obzir geometrijske karakteristike centralnog podzemnog dvorišta [17] i navedenih prostorija (Slika 10), odgovarajuće građevinske materijale (lokalno dostupne, Tabela 2), razrađena su dva

simulaciona modela (Slika 11a-c), jedan za slučaj kada su prostorije fizički odvojene (Tip 1), drugi kada su fizički spojene (Tip 2).

Tabela 1. Meteorološki podaci za grad Kragujevac [16]

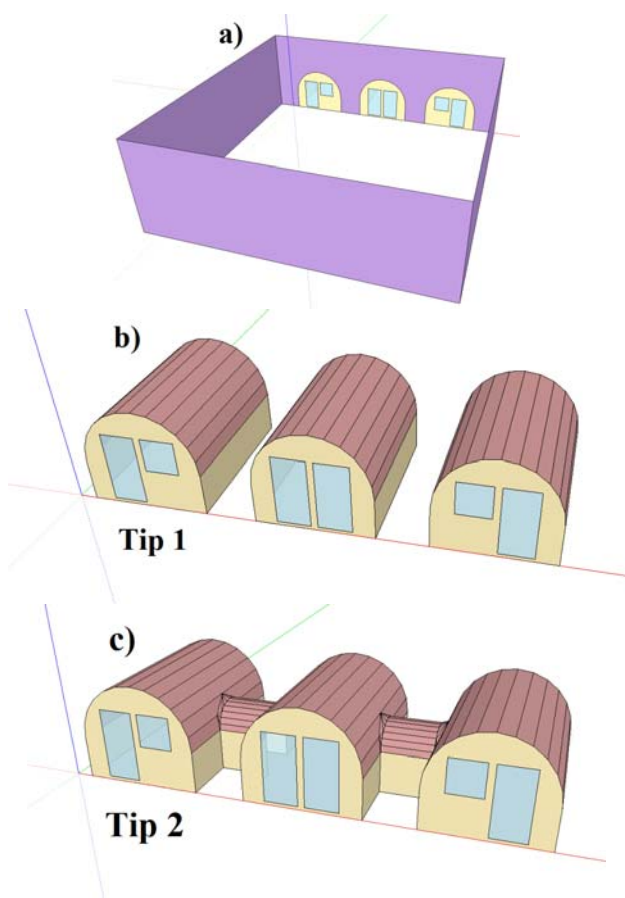
Mesec	Temperatura [°C]	Solarno zračenje [W/m ²]	
		Direktno	Difuzno
I	-0,24	63,63	33,30
II	0,88	86,66	49,39
III	5,57	106,12	77,08
IV	10,87	149,02	92,65
V	16,06	176,45	113,30
VI	18,85	208,94	109,50
VII	20,78	228,12	110,60
VIII	20,38	215,40	96,25
IX	16,68	166,92	75,54
X	11,18	119,43	57,34
XI	6,08	64,51	39,83
XII	1,13	58,86	28,66

Tabela 2. Građevinska fizika *Yaodong* podzemne zgrade

Materijal	d [m]	k [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]
ZS-I, ZS-Z, ZS-S (istočni, zapadni i severni spoljašnji zidovi)				
Hidroizolacija	0,002	0,19	1100	1460
Puna opeka	0,25	0,64	1600	920
Krečni malter	0,025	0,81	1600	1050
POD (pod)				
Armirani beton	0,04	2,04	2400	960
Hidroizolacija	0,002	0,19	1100	1460
Nearmirani beton	0,15	0,93	1800	960
Cementna košuljica	0,04	1,4	2100	1050
KR (krov)				
Hidroizolacija	0,002	0,19	1100	1460
Nearmirani beton	0,05	0,93	1800	960
Cementna košuljica	0,04	1,4	2100	1050
Puna opeka	0,25	0,64	1600	920
Krečni malter	0,025	0,81	1600	1050
ZS-J (južni spoljašnji zid)				
Jednoslojno staklo	0,004	0,9	2500	800
Drveni ram	0,035	0,14	550	2090

Broj izmena vazduha ($n=0,76$) usvojen je prema preporukama u [18]. U istom izvoru može se naći koeficijent transformacije primarne energije (za električnu energiju $R_{EL}=2,5$).

³ Sve prostorije su opremljene individualnim električnim grejnim telima.



Slika 11. Simulacioni scenario

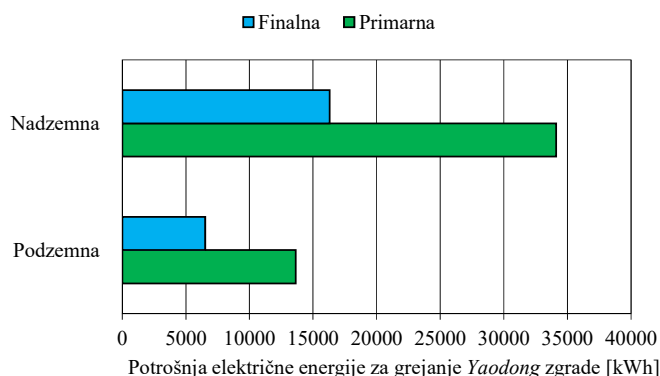
IV REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Na Slici 12 prikazana je sezonska potrošnja finalne i primarne energije tokom grejne sezone u nadzemnoj⁴ i podzemnoj Yaodong zgradi koja se sastoji od fizički odvojenih prostorija (Tip 1). Potrošnja finalne i primarne energije u nadzemnoj i podzemnoj Yaodong zgradi sa fizički spojenim prostorijama (Tip 2), tokom istog perioda, predstavljena je na Slici 13.

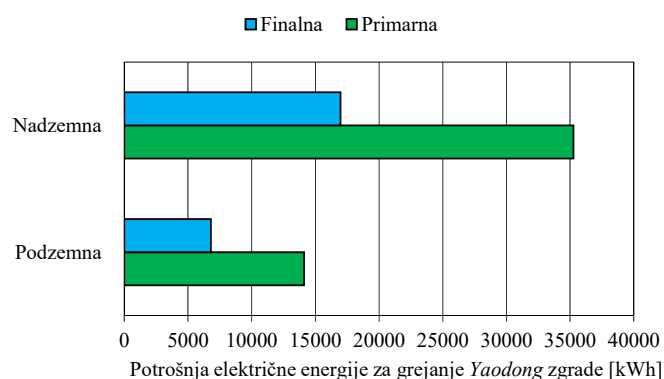
Potrošnja finalne (električne) energije u nadzemnoj Yaodong zgradi (Slika 11b, Tip 1) tokom grejne sezone iznosi 13645,88 kWh (Slika 12). U podzemnoj Yaodong zgradi, zahvaljujući benefitima korišćenja prirodnih i stvorenih parametara lokacije, potrošnja finalne energije može se redukovati i preko 50% (6522,74 kWh). Energetski benefiti korišćenja podzemnih Yaodong zgrada još su veći, ako se sagleda šira slika (kroz potrošnju primarne energije): 34114,7 kWh (za nadzemnu kuću), 16306,85 kWh (za podzemnu kuću).

U slučaju nešto zahtevnijeg građevinskog poduhvata (Slika 11c, Tip 2), potrošnja finalne energije u Yaodong zgradi iznosila bi (Slika 13): 14106,94 kWh (za nadzemnu zgradu), 6787,91 kWh (za podzemnu zgradu). To znači da bi potrošnja primarne energije u ovom slučaju bila redukovana za 51,88%, tj. sa 35267,35 kWh na 16969,78 kWh.

⁴ Yaodong zgrada koja nije zaklonjena i ukopana (prekrivena, nasuta) u terenu, već ima otvoren položaj, što znači da je izložena vremenskim prilikama, prvenstveno vetru i solarnom zračenju.

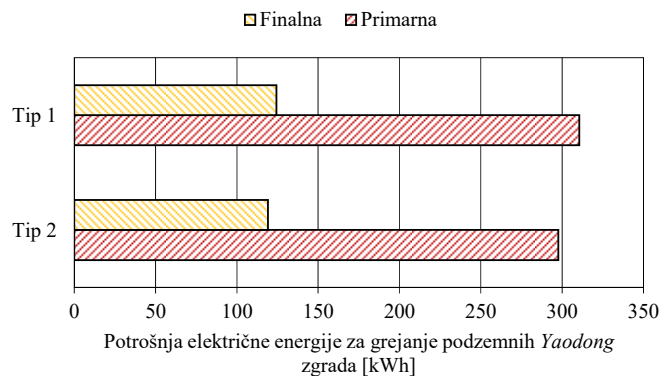


Slika 12. Sezonska potrošnja finalne i primarne energije u nadzemnoj i podzemnoj Yaodong zgradi (Tip 1)



Slika 13. Sezonska potrošnja finalne i primarne energije u nadzemnoj i podzemnoj Yaodong zgradi (Tip 2)

Ako se međusobno uporede podzemne (Tip 1 i Tip 2) Yaodong zgrade (Slika 12, Slika 13), potrošnja električne energije u zgradi Tipa 2 veća je od potrošnje u zgradi Tipa 1 (finalna za 4,07%, primarna za 662,93 kWh).



Slika 14. Sezonska potrošnja finalne i primarne energije u podzemnim Yaodong zgradama (Tip 1, Tip 2)

Ako se prilikom poređenja podzemnih Yaodong zgrada Tipa 1 i Tipa 2 u obzir uzme indikator specifične potrošnje električne energije ($A_{POD}=52,5 \text{ m}^2$ za Tip 1, $A_{POD}=57 \text{ m}^2$ za Tip 2), tada se dolazi do sledećih rezultata (Slika 14): za zgradu Tipa 1 (124,24 kWh/m² finalne, 310,6 kWh/m² primarne), za zgradu Tipa 2 (119,09 kWh/m² finalne, 297,73 kWh/m² primarne). Drugim rečima, potrošnja električne energije u podzemnoj Yaodong

zgradi Tipa 2 manja je za 4,32% od potrošnje u podzemnoj *Yaodong* zgradi Tipa 1.

VIII ZAKLJUČAK

U ovom radu numerički je analizirana potrošnja finalne i primarne energije u tradicionalnoj podzemnoj *Yaodong* zgradi lociranoj na teritoriji grada Kragujevca. Glavni cilj istraživanja je skretanje pažnje na potencijal korišćenja ovog arhitektonskog koncepta na teritoriji Republike Srbije.

Iako su rezultati simulacija (u softveru *EnergyPlus*) pokazali da se u podzemnim *Yaodong* zgradama troši dosta manje energije (u ovom konkretnom slučaju uštede su nešto veće od 50%) nego u nadzemnim zgradama istog geometrijskog dizajna, eventualna buduća primena ovog koncepta na teritoriji Republike Srbije zahtevala bi multidisciplinarno sagledavanje problematike, što podrazumeva uzimanje u obzir i drugih indikatora, pored energetskih: ekološki, ekonomski, sociološki, psihološki, istorijski, kulturološki, itd.

ZAHVALNICA

Ovaj rad predstavlja rezultate istraživanja nastalih u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, broj TR 33015. Zahvaljujemo se Ministarstvu na finansijskoj podršci tokom ovog istraživanja.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Living Inside the Earth: the Yaodong, cave buildings in China. <https://socks-studio.com/2021/06/21/living-inside-the-earth-the-yaodong-cave-buildings-in-china/> [pristupljeno 15. 02. 2023]
- [2] Northern China's yaodong last centuries. <https://archive.shine.cn/sunday/now-and-then/Northern-Chinas-yaodong-last-centuries/shdaily.shtml> [pristupljeno 24. 02. 2023]
- [3] Milanović, A. *Razvoj podzemnih stambenih objekata i njihova savremena primena u Srbiji*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2016.
- [4] 12 Regions of China: The Loess Plateau. <https://thediplomat.com/2017/07/12-regions-of-china-the-loess-plateau/> [pristupljeno 01. 02. 2023]
- [5] Golany, G.S. *Earth-sheltered habitat: history, architecture, and urban design*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1983
- [6] Yaodong (Loess Cave House). <https://www.asiaculturaltravel.co.uk/yaodong-loess-cave-house/> [pristupljeno 10. 02. 2023]
- [7] Take a look at China's sunken courtyard houses, where people traditionally lived in pit homes carved into the ground. <https://www.insider.com/china-cave-dwellings-pit-homes-dikengyuan-yaodong-photos-2022-4> [pristupljeno 10. 02. 2023]
- [8] Anselm, A.J. Passive annual heat storage principles in earth-sheltered housing, a supplementary energy saving system in residential housing. *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 7, pp. 1214-1219, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.11.002>
- [9] Zhang, L., Lau, R., Yan, L., Li, X., Zang, R., Leung, H.H., Chen, P., Wang, X. Unique traditional villages on the Loess Plateau of China: historic evolution and challenges to sustainable development of silo-caves, *Heritage Science*, Vol. 9, No. 118, pp. 1-19, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00591-4>
- [10] Anselm, A.J. Earth shelters; A review of energy conservation properties in earth-sheltered housing, in: Ahmed, A.Z. (Ed.), *Energy Conservation*, Ch. 5, pp. 125-48, InTech, [Place of publication not identified], 2012. <https://doi.org/10.5772/51873>
- [11] Wang, F., Yu, F., Zhu, X., Pan, X., Sun, R., Cai, H. Disappearing gradually and unconsciously in rural China: Research on the sunken courtyard and the reasons for change in Shanxian County, Henan Province, *Journal of Rural Studies*, Vol. 47, Part B, pp. 630-649, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2016.05.011>
- [12] Đukić, P. Pravična tranzicija energetike Srbije – održivost reformi u uslovima nove globalne krize, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 3, pp. 53-62, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-3.53D>
- [13] Vasić, G. Šta to povezuje energetske tranzicije i ruralni razvoj u Srbiji?, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 55-59, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.55G>
- [14] Raković, R., Petrović Bećirević, S. Energetski menadžment i ciljevi održivog razvoja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 2, pp. 46-53, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-2.46R>
- [15] Benardos, A., Athanasiadis, I., Katsoulakos, N. Modern earth sheltered constructions: A paradigm of green engineering, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 41, pp. 46-52, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.11.008>
- [16] <https://designbuilder.co.uk/cahelp/Content/Instructions.htm> [pristupljeno: 7. 1. 2023]
- [17] <https://earth.google.com/web/@34.64734532,111.29470894,694.00912518a,195.13737761d,35y,0h,0t,0r> [pristupljeno 27. 1. 2023]
- [18] Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada Republike Srbije (Službeni glasnik Republike Srbije, br. 61/2011). https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetskoj_efikasnosti_zgrada.html [pristupljeno 27.01.2023]

AUTORI/AUTHORS

msr Aleksandar Nešović - istraživač-saradnik, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, aca.nesovic@gmail.com, ORCID [0000-0002-1690-2389](https://orcid.org/0000-0002-1690-2389)

dr Danijela Nikolić - vanredni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, danijelan@kg.ac.rs, ORCID [0000-0003-3267-3974](https://orcid.org/0000-0003-3267-3974)

dr Nebojša Lukić - redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, lukic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1923-5200](https://orcid.org/0000-0002-1923-5200)