

Alen Hausmeister, univ. dipl. inž. arh
alen.hausmeister@zag.si



dr. Jože Hafner, univ. dipl. inž. str.
joze.hafner@zag.si
Zavod za gradbeništvo Slovenije,
Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana



doc. dr. Katja Malovrh Rebec, univ. dipl. inž. arh.
katja.rebec@gmail.com
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko,
Tržaška 25, 1000 Ljubljana
Univerza na Primorskem, Fakulteta za matematiko,
naravoslovje in informacijske tehnologije,
Glagoljaška 8, 6000 Koper



Znanstveni članek

UDK/UDC: 502.174.3:004.414.23:69+53

METODOLOGIJA ZA RAČUNANJE RABE ENERGIJE V OBSTOJEČIH STAVBAH, ZAŠČITENIH KOT KULTURNA DEDIŠČINA PO PURES-3: PRIMERJAVA SCENARIJEV

METHODOLOGY FOR CALCULATING ENERGY USE IN EXISTING BUILDINGS PROTECTED AS CULTURAL HERITAGE ACCORDING TO PURES-3: COMPARISON OF SCENARIOS

Povzetek

V članku je predstavljena metodologija za izračun rabe energije v obstoječih stavbah, zaščitene kot kulturna dediščina, s poudarkom na primerjavi mesečne in dinamične metode. Evropska in slovenska gradbena zakonodaja predvidevata postopno uvajanje dinamične metode, ki temelji na urnih vhodnih podatkih in simulira pogoje delovanja objekta na podlagi 3D-modela. V Sloveniji se poleg novega Pravilnika o učinkoviti rabi energije (PURES-3) uvaja tudi obvezna raba informacijskega modeliranja građenj (BIM). V študiji smo preizkusili različne metodologije za pripravo in prenos podatkov v BIM okolju ter izvedli izračune z uporabo programske opreme CYPE Thermal, ki temelji na dinamičnem orodju EnergyPlus. Za referenčni objekt smo določili štiri scenarije, ki vključujejo različne posege na ovoj stavbe ter aktivno in pasivno senčenje. Ugotovili smo, da obstajajo pomembna odstopanja med obema metodama, ki se razlikujejo glede na specifične scenarije. Največji vpliv na razlike imata pogostost vhodnih podatkov o temperaturi okolice in solarni dobitki, ki jih dinamična metoda obravnava z večjo natančnostjo. Ta raziskava ponuja pomembne vpogled v metodologijo izračuna energijske učinkovitosti stavb, kar je ključno za trajnostno prenovo obstoječega stavbnega fonda v Sloveniji.

Ključne besede: gradbena fizika, dinamične simulacije, učinkovita raba energije, spomeniško zaščitene stavbe, informacijsko modeliranje, BIM

Summary

This paper presents a methodology for calculating energy use in existing cultural heritage buildings, comparing static (monthly) and dynamic (hourly) methods. European and Slovenian building legislation is gradually introducing the dynamic method, which simulates actual operating conditions based on a 3D model. In Slovenia, the use of Building Information Modelling (BIM) is also becoming mandatory for better data management in construction processes. We tested different methodologies for data preparation and transfer in a BIM environment and performed calculations using CYPE Thermal software based on the EnergyPlus dynamic tool. We focused on a 1960s reference building, defining four scenarios involving different interventions on the building envelope and active/passive shading. All scenarios were calculated using both monthly and hourly methods. Significant discrepancies were found between the two methods, varying depending on the specific scenarios. The dynamic method treats ambient temperature data and solar gains more accurately and allows better control of shading on transparent parts of the envelope, leading to improved prevention of overheating in summer and optimization of solar gains in winter. This study provides important insights into the methodology for calculating the energy performance of buildings, crucial for the sustainable renovation of the existing building stock in Slovenia.

Key words: building physics, dynamic simulations, efficiency in built environment, heritage buildings, information modeling, BIM

1 UVOD

Statistični podatki kažejo, da bo leta 2050 kar 80 % danes obstoječih objektov še vedno v uporabi, pri čemer bo sanacija teh objektov predstavljala večji izziv kot gradnja novih objektov po novih standardih [Ramos-Carranza et al, 2021]. Trajnostne prakse pa v gradbeništvo vstopajo počasi predvsem zaradi omejenega razumevanja in stroškovnih pomislekov [Zainul Abidin, 2010]. Po drugi strani evropska sredstva zahtevajo trajnostno izvajanje projektov, ki morajo ustrezati sodobnim standardom glede varovanja okolja in rabe energije.

Evropska unija se zavezuje k doseganju podnebne nevtralnosti do leta 2050 [Wolf et al, 2021]. Zgradbe prispevajo več kot tretjino emisij toplogrednih plinov in so s tem ključne za trajnostno prihodnost [Jeong et al, 2021]. Prenovljena direktiva o energijski učinkovitosti stavb EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) [Directive - EU - 2024/1275 - EN - EUR-Lex, n.d.] želi izboljšati energijsko učinkovitost in zmanjšati porabo energije v stavbah EU. Kljub temu pa je učinkovito izvajanje takšnih direktiv na nacionalni ravni odvisno od usklajenih prizadevanj, tehnološkega napredka in pravočasnih prilagoditev. V Sloveniji je bil sprejet niz zakonov, pravilnikov in smernic, ki neposredno ali posredno vplivajo na energijski in okoljski odtis zgradb. Med najpomembnejšimi so GZ-1 (Gradbeni zakon) [UL RS, št. 199/21, 2021], PURES-3 (Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah) [Ministrstvo za okolje in prostor, 2022a] ter spremljevalna tehnična smernica TSG-1-004: 2022 (Energijska učinkovitost stavb) [Ministrstvo za okolje in prostor, 2022b].

1.1 Gradbeni zakon in objekti, zavarovani kot kulturna dediščina

GZ-1, sprejet leta 2021, med drugim določa, da morajo objekti izpolnjevati bistvene zahteve glede na namen, vrsto, velikost, zmogljivost, predvidene vplive in druge značilnosti objekta ter druge zahteve. Med bistvenimi zahtevami je 4 od 8 točk neposredno ali posredno povezanih z ugodjem v stavbah in izračunom gradbene fizike (GF, 25. Člen GZ-1).

tč. 3 Higijenska in zdravstvena zaščita ter zaščita okolja

tč. 5 Zaščita pred hrupom

tč. 6 Varčevanje z energijo, ohranjanje toplote in raba obnovljivih virov energije

tč. 8 Trajnostna raba naravnih virov

V istem členu (4. odstavek) je določeno, da je treba izvajati različne posege na stavbah (rekonstrukcija, manjša rekonstrukcija, vzdrževanje, vzdrževalna dela v javno korist, sprememba namembnosti), tako da so izpolnjene vse bistvene zahteve, ki so predmet spreminjanja. Omenjena zahteva glede izpolnjevanja bistvenih in drugih zahtev se ne uporablja le, če je tehnično neizvedljivo ali povezano z nesorazmernimi stroški. Pri spreminjanju objektov se gradbenotehnične lastnosti ne smejo poslabšati (5. odstavek). Istočasno pa za posege v smislu GF, TSG-1-004: 2022 (str. 9) predpostavlja, da je verjetnost, da so ukrepi tehnično neizvedljivi ali ekonomsko neupravičeni, zelo majhna.

Izjema so objekti, zavarovani kot kulturna dediščina, če to izhaja iz mnenja ali pogojev pristojnega mnenjedajalca za področje (6. odstavek). V praksi pogosto srečamo reševanje te

problematike, ki daje prednost varovanju zaščitenim elementom v primerjavi s pogoji GF v objektu. V primeru, da so takšni objekti mnogo bolj potratni od primerljivih spomeniško nezaščitenih objektov, obstaja velika verjetnost, da se vanje ne vloga in se s tem pospeši njihovo propadanje.

GF-pogoji imajo vpliv tako na bivalno ugodje v stavbi, na stroške zagotavljanja bivalnega ugodja ter na okoljske odtise, ki jih objekt povzroča. Prenova stavbnega ovoja je eden izmed ukrepov, ki lahko pozitivno vpliva na vse tri. Zato je kljub izjemi, ki je mogoča z vidika zakonodaje, smiselno razmišljati o načinih, kako energijsko učinkovitost takšnih objektov približati učinkovitosti novogradenj, ki v celoti upoštevajo veljavno zakonodajo.

1.2 Zakonodaja za izračun rabe energije (PURES-3 in TSG-1-004:2022)

Pravilnik PURES-3 določa tehnične zahteve za graditev skoraj ničenergijskih stavb, ki morajo biti izpolnjene za doseganje energijske učinkovitosti stavb na področju lastnosti toplotnega ovoja stavbe, tehničnih stavbnih sistemov, ogrevanja, hlajenja, klimatizacije, prezračevanja ali njihove kombinacije, priprave tople sanitarne vode, razsvetljave, avtomatizacije in nadzora TSS (tehničnih stavbnih sistemov), zagotavljanja lastnih obnovljivih virov energije vključno s proizvodnjo električne energije na kraju samem, zagotavljanja podpore e-mobilnosti za potrebe uporabnikov stavb, v skladu z Direktivo 2010/31/EU Evropskega parlamenta in Sveta z dne 19. maja 2010 o energijski učinkovitosti stavb 1.

Skupaj s PURES-3 je stopila v veljavo tehnična smernica TSG-1-004:2022, ki uvaja pomembne novosti, vključno s konceptom sNES (skoraj nič-energijskih stavb), nove kazalnike, usklajene z evropskimi standardi, in posodobljene minimalne zahteve, ki temeljijo na vrstah stavb, rabi, lokaciji in starosti, kar odraža zavezo k doseganju skoraj ničenergijskih standardov ter poudarja uravnotežen pristop k dejavnikom, kot so toplotne lastnosti ovoja stavbe, učinkovitost tehničnega sistema, upoštevanje podnebnih značilnosti Slovenije in pasivne strategije za zmanjšanje potreb po ogrevanju, hlajenju in razsvetljavi notranjosti stavb ob upoštevanju proizvodnje energije iz obnovljivih virov. Zahtevane vrednosti toplotne prehodnosti (vrednosti U) za različne elemente ovoja stavbe so se po novi tehnični smernici TSG-1-004:2022 glede na TSG-1-004:2010 zmanjšale, kar avtomatsko vodi k nižjim toplotnimi izgubam stavb. Glavni poudarek PURES-3 je na drastičnem zmanjšanju porabe primarne energije (energije, ki jo pridobimo iz osnovnih virov neobnovljivih goriv, kot so kurilno olje, plin itd.) in v več kot 50% deležu obnovljivih virov energije za ogrevanje, hlajenje in razsvetljavo. Vse te zahteve vodijo v zelo pazljivo načrtovanje virov energije tako na strani porabe kakor tudi na strani virov.

PURES-3 prinaša številne pomembne novosti predvsem na področju natančnosti izračunane porabe energije glede na izmerjeno porabo. Ena izmed pomembnih novosti, ki jih vpeljuje, je uvedba urne računske metode (nestacionarnega modeliranja po PURES-3) za energetske zahtevne stavbe, ki omogoča bolj natančno oceno potreb po energiji v stavbi. Za tak pristop je potreben 3D-model objekta, kar sovпада z zahtevo v GZ-1, ki v 39. členu, točki 9 navaja, naj se projektna dokumentacija za velik del javnih objektov izdela s pomočjo informacijsko podprtega projektiranja (BIM-orodja), kar stopa v veljavo leta 2024.

Informacijskega modeliranja gradenj (BIM) je v teoriji mogoče uporabiti kot osnovo za modeliranje po PURES-3.

Urna ali dinamična računska metoda (nestacionarno modeliranje), ki jo PURES-3 predpisuje za energetske zahtevne stavbe, je bila zaradi nepotrjenega računskega orodja, ki bi omogočal izračun po urni metodi, po uvedbi pravilnika v letu 2022 začasno izločena (21. Člen PURES-3). Za energetske zahtevne objekte je do konca leta 2025 dovoljena mesečna ali statična računska metoda (stacionarno modeliranje), ki jo PURES-3 sicer predpisuje za energetske nezahtevne oz. energetske manj zahtevne objekte. Za energetske zahtevne stavbe pravilnik v celoti stopi v veljavo 1. 1. 2026.

V tehničnih normativih, pravilnikih in smernicah se uporablja različno izrazoslovje v zvezi z naslavljanjem terminov v povezavi z energijo. Včasih je uporabljen izraz »energetski« včasih »energijski«. Termina pomensko ne odstopata in sta sopomenki. V nadaljevanju sta uporabljena oba z namenom slediti izrazoslovju posameznih pravilnikov. PURES-3 govori o »energetskih« conah, ki pa so v standardu SIST EN ISO 52016-1, ki je izšel pred nacionalnim pravilnikom, naslovljene še s »toplotnimi« conami, kot je to veljalo v PURES-2 [Ministrstvo za okolje in prostor, 2008].

1.2.1 Energetska zahtevnost stavbe

PURES-3 stavbe razdeli med različno energetske zahtevne, kar je osnova za izbiro metode, po kateri se dokazuje energijska učinkovitost stavbe (mesečna ali urna računska metoda) oziroma izračun GF. V primerih, kjer je zahtevana mesečna računska metoda, je dopustna uporaba urne računske metode, ne pa obratno. V PURES-3 so okrajšane vgrajene inštalacije in tehnološke naprave v stavbi, potrebne za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje in klimatizacijo, vključno z navlaževanjem in razvlaževanjem zraka, pripravo tople sanitarne vode, vgrajeno razsvetljavo prostorov ali kombinacijo teh sistemov, avtomatizacijo in nadzor stavbe, sistemi za proizvodnjo energentov v na, ob stavbi ali v njeni neposredni bližini z oznako TSS.

Energetsko nezahtevne stavbe (mesečna računska metoda) - $A_{use} < 50 \text{ m}^2$

Stavbe s kondicionirano površino (A_{use}), manjšo ali enako 50 m^2 , in so vsaj občasno namenjene bivanju ali opravljanju dejavnosti ter imajo poleg sistema za razsvetljavo vgrajen vsaj še en TSS. (Preverjajo se samo toplotne prehodnosti posameznih konstrukcij, ni treba izdelati GF za celoten objekt).

Energetsko manj zahtevne stavbe (mesečna računska metoda) - $50 \leq A_{use} < 500 \text{ m}^2$

Stavbe s kondicionirano površino, večjo ali enako 50 m^2 in manjšo od 500 m^2 . Lahko imajo več con (glej naslednji odstavek) z različno klasifikacijo, v katerih se vzdržuje enaka ali različna temperatura notranjega okolja. Za energetske manj zahtevne stavbe se štejejo tudi večstanovanjske stavbe in nestanovanjske stavbe z uporabno površino, večjo ali enako 500 m^2 , če imajo posamezni deli stavbe samostojne in neodvisne TSS.

Energetsko zahtevne stavbe (urna računska metoda) - $A_{use} \geq 500 \text{ m}^2$

Energetsko zahtevne stavbe so stavbe s kondicionirano površino, večjo ali enako 500 m^2 .

1.2.2 Energetske cone

Za razliko od PURES-2, ki je ločil med toplotnimi conami, PURES-3 loči med energetskimi conami. Stavba ima eno ali več energetskih con. Energetske cone se določijo po standardih SIST EN ISO 52000-1 in SIST EN ISO 52016-1. Za nestanovanjske stavbe se pogoji notranjega okolja v energetski coni določijo po standardu SIST ISO 18523-1. Pravila za združevanje delov stavbe v energetske cone in možne poenostavitve so opredeljena v standardih SIST EN ISO 52000-1 in SIST EN ISO 52016-1 ter v tehnični smernici TSG-1-004:2022.

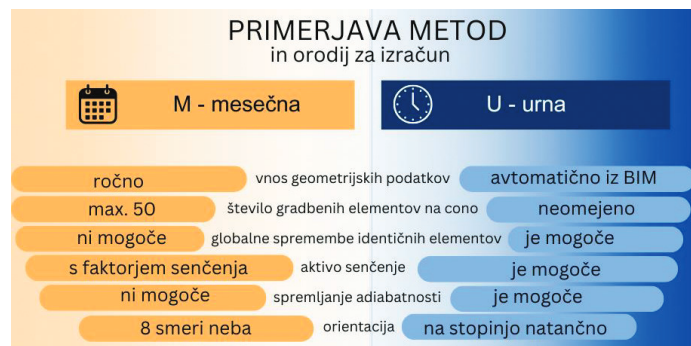
Stavba ali del stavbe se obravnava kot posamezna energetska cona (v standardu toplotna cona) ali pa je razdeljena na več kot eno energetske cone (v standardu toplotno cono). Po standardu SIST EN ISO 52016-1 je določen koračni pristop coniranja. Opredeljeni so naslednji koraki:

1. Za vsak prostor je določena kategorija prostora ob upoštevanju postopkov za oceno skupine energijske lastnosti.
2. Vsi sosednji prostori, ki pripadajo isti kategoriji prostora, so združeni v eno toplotno cono.
3. V primeru velikih odprtin med prostori so prostori združeni v eno toplotno cono.
4. Toplotna cona je razdeljena tako, da vsebuje samo prostore, ki si delijo enako kombinacijo ustrezne tehnične opreme.
5. Sosednje cone s toplotno uravnavanimi pogoji se lahko združijo, če so toplotni pogoji uporabe enaki ali podobni.
6. Pri izračunih, značilnih za sistem, je toplotno cono morda treba razdeliti zaradi pravil (če obstajajo) v ustreznih sistemskih standardih, da se zagotovi določena homogenost v sistemu ali podsistemu znotraj toplotne cone.
7. Toplotna cona se razdeli tako, da je pri bilanci toplote do neke stopnje homogena. Kriteriji so strožji, če je vključeno hlajenje.
8. Sosednje cone brez toplotno uravnavanih pogojev je mogoče združiti.
9. Majhna toplotna cona se lahko združi s sosednjo toplotno cono, če ima enak nabor tehnične opreme, vendar različne pogoje uporabe.
10. Zelo majhna toplotna cona se lahko združi s sosednjo toplotno cono tudi, če ima različen nabor tehnične opreme.

1.3 Mesečna in urna računska metoda

Leta 2017 je bil objavljen sklop standardov za energijsko učinkovitost stavb (EPBD - Energy Performance of Buildings Directive). Eden ključnih standardov EPBD je (EN) ISO 52016-1 za izračun potreb po energiji za ogrevanje in hlajenje, notranjih temperatur ter občutljivih in latentnih toplotnih obremenitev. Ta standard nadomešča standard (EN) ISO 13790:2008. Tako kot njegov predhodnik tudi standard ISO 52016-1 vsebuje mesečno in urno metodo, vendar je urna metoda v standardu ISO 52016-1 naprednejša in primernejša za obravnavo dinamičnih učinkov. Predvsem pa je standard začel naslavljal učinke prilagodljivih fasadnih elementov (senčil) in uvedel merila in postopke za alternativne izračune [van Dijk, 2019]. Tako imenovana urna metoda izračuna energijske učinkovitosti stavb načeloma zagotavlja natančnejšo oceno potreb po energiji v stavbah v primerjavi z mesečno metodo. Z upoštevanjem dejavnikov, kot so vremenski podatki,

vedenje uporabnikov in potrebe po energiji na urni osnovi, vključno s senčenjem, urna metoda omogoča podrobno in dinamično oceno, ki zajema nihanja porabe energije čez dan preko celotnega leta. Ena izmed ključnih prednosti je tudi upoštevanje adiabatnosti, ki omogoča analizo vpliva ene cone na drugo brez dodatnega preračunavanja količin, površin in volumnov. Primerjava bistvenih razlik med metodologijo in dostopnimi orodji za izračun po mesečni in urni metodi je prikazana na sliki 1.



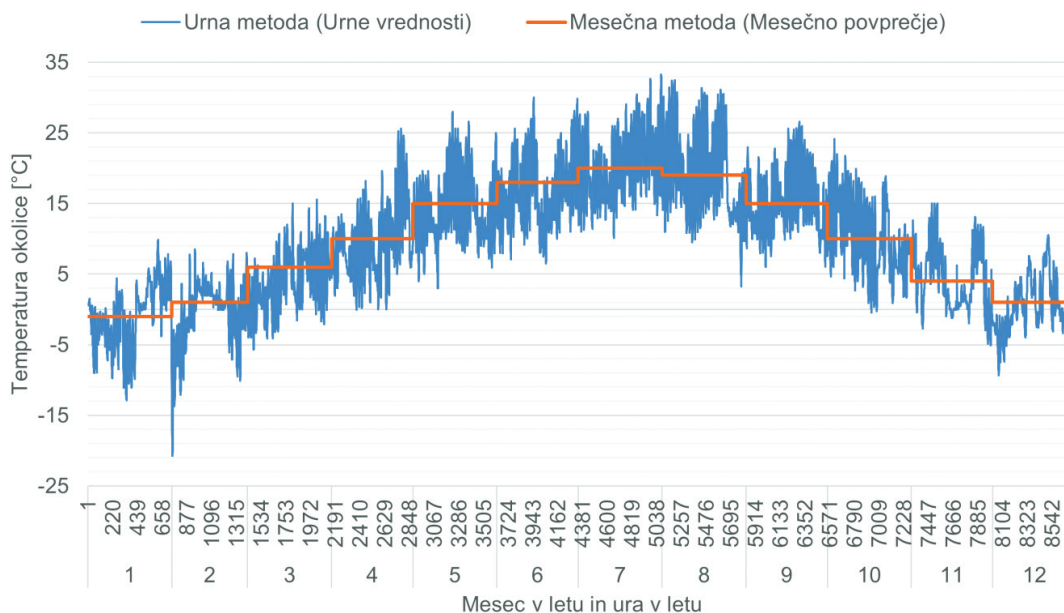
Slika 1. Primerjava bistvenih razlik med metodologijo in dostopnimi orodji za izračun po mesečni in urni metodi.

Pri vremenskih podatkih gre za izbor najbolj primernih izmerjenih vrednosti, izbranih iz vsaj 10-letnih meritev, za določeno lokacijo. Vremenski podatki na urni gostoti zajemajo temperaturo zraka (glej sliko 2), direktno in difuzno sončno obsevanje, relativno vlago in hitrost vetra; natančno definirani v standardu SIST EN ISO 15927-4: 2005 [International Organization for Standardization, 2005]. Opisana pogostost omogoča bolj natančno razumevanje potreb po ogrevanju in hlajenju in s tem na celotno energijsko učinkovitost stavb. V nasprotju s tem mesečna metoda, ki je osnovana zgolj na

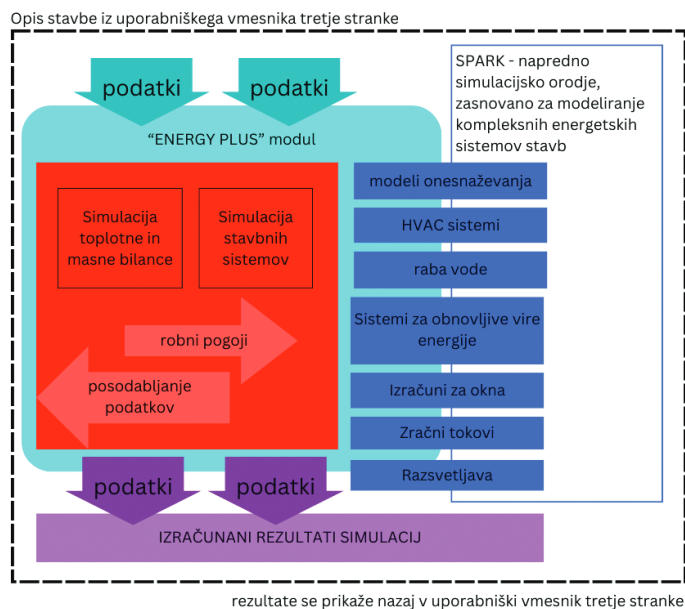
mesečnih povprečjih, lahko privede do posplošenih, manj natančnih rezultatov. Ena od že izvedenih študij [Di Giuseppe et al, 2019] je pokazala, da primerjava rezultatov obeh metod izračuna glede na mesečne potrebe po energiji za ogrevanje in hlajenje, izračunane v treh podnebnih območjih, kaže izrazite razlike med metodami, in sicer v zimskem času mesečna metoda porabo energije podceni do 100 % v dveh primerih izračuna, pri enem pa jo preceni za 59 % glede na urno metodo. Poleti so izračunane razlike med metodama manjše in dosežejo okvirno 11 %. Študije kažejo tudi na pomanjkljivosti urne metode. Predpostavke, povezane z definicijo zunanje konvekcije in kratkovalovnega sončnega sevanja, vodijo do netočnosti urnega modela v standardu EN ISO 52016-1 [De Luca et al, 2021]. V Italiji so z uvedbo priloge A nacionalnemu standardu že uvedene izboljšave urne metode, uvedene po EN ISO 52016-1, ki uvaja alternativno metodologijo števila vzlišč in položaja na podlagi podrobnih značilnosti slojev [Mazzarella, 2020].

1.4 Programska orodja za simulacijo po urni metodi

Za izvedeno študijo smo izbrali programsko orodje CYPE Thermal, ki bazira na računskem orodju EnergyPlus (glej shematski prikaz na sliki 3) in podpira BIM prenos podatkov. Omogoča analizo energijske učinkovitosti po urni metodi, analizo udobja v prostorih, simulacijo ogrevanja, hlajenja in prezračevanja. Ta programska oprema omogoča standardizirano generiranje poročil in izračunov, ki so potrebni za dokumentiranje rezultatov za izdelavo izkazov in elaboratov. Omejene lastnosti, prilagoditev izračunov na slovenski prostor ter ne nazadnje prevedeno delovno okolje v slovenski jezik so kriteriji, ki programsko opremo uvrščajo med eno izmed potencialnih orodij, za izračune po PURES-3. Izkazalo se je kot uporabno v primerjalni študiji med pasivnim standardom in sNES [Borralló-Jiménez et al, 2022] in raziskavah s področja zakonodaje v drugih evropskih deželah [Gangoellis et al, 2020].



Slika 2. Primerjava vhodnih podatkov temperature za obe metodi; lokacija Ljubljana - Brnik.



Slika 3. Shematski prikaz interakcije med programskim orodjem CYPE Thermal in računskim orodjem EnergyPlus.

Obstajajo še druga simulacijska okolja, ki omogočajo izračune po urni metodi, na primer ADMIT, TRNSYS, SUNCODE itd. Študije so pokazale, da SUNCODE podcenjuje toplotne izgube v primerjavi s TRNSYS-om, ta pa po drugi strani uporablja pristop prenosne funkcije, ki je občutljiv za začetno predpostavljeno vrednost sobne temperature. ADMIT predstavlja kvazistacionarno periodično nihanje in ni primeren za prehodna nihanja. Pri izoliranih lahkih stavbah mehanizmi prenosa toplote niso odločilni dejavniki. Modeli se razlikujejo tudi pri obravnavi prehajanja energije sončnega obsevanja skozi zastekljeno okno. Za okna na južni strani stavbe in spremembe pogojev v izolirani stavbi se rezultati, dobljeni s programoma SUNCODE in ADMIT, dobro ujemajo, rezultati, dobljeni s programom TRNSYS, pa se znatno razlikujejo, kot je bilo navedeno v prejšnjih študijah [Bansal and Bhandari, 1996]. Nekateri raziskave [Perini et al, 2017] so pokazale dobro souporabo TRNSYS z Grasshopperjem. Kot grafični vmesnik lahko služi programsko orodje SketchUp.

1.5 Digitalizacija in novi načini komuniciranja pri projektiranju

Za urno metodo je zelo uporaben BIM-model objekta, na podlagi katerega se izvede simulacija. BIM-model je tudi sicer koristen za izboljšanje projektiranja in nadaljnega upravljanja objekta, zato niso pomembni samo simulacija in pridobljeni podatki, temveč tudi izmenjava podatkov v tem okolju. V Sloveniji bo sčasoma vse gradivo grajenega okolja na voljo v BIM-obliki, saj ga predvideva gradbeni zakon (GZ-1) – Uradni list RS, št. 133/23, z dne 27. 12. 2023, 39. člen: (9) Projektna dokumentacija za objekte iz četrtega odstavka 9. člena tega zakona se izdelava s pomočjo informacijsko podprtega projektiranja (BIM-orodja). BIM je proces, ki omogoča ustvarjanje in upravljanje digitalnih predstavitev fizičnih in funkcionalnih značilnosti zgradb, medtem ko energetski modeli stavb (Building Energy Modeling – BEM) predstavljajo analitični pristop za oceno energijske učinkovitosti stavb; oboje pa je mogoče učinkovito

povezati preko formata IFC (Industry Foundation Classes), ki omogoča interoperabilnost med različnimi programskimi orodji, in poenostavi izmenjavo podatkov med BIM in BEM. IFC se razvija v različnih verzijah, pri čemer je glavni izziv skalabilnost in pogosto neujemanje med različnimi orodji verzij, pri čemer je trenutno najbolj napredna različica IFC4, ki je usklajena z zahtevami v standardu ISO 16739-1:2024 [International Organization for Standardization, 2024]. Stopnja modeliranja ali stopnja razvoja modela (Level of Development – LOD) pomeni raven, ki opisuje stopnjo, do katere je razvit (modeliran) gradnik modela. Raven geometrije (LOG) opisuje raven razvoja geometrijske predstavitve objektov v digitalnem modelu [Zavod za gradbeništvo Slovenije; Slovensko združenje za informacijsko modeliranje gradenj, 2023]. Informacijska specifikacija za dostavo informacij (Information Delivery Specification – IDS) je standardiziran dokument, ki omogoča jasno opredelitev in izmenjavo informacijskih zahtev v gradbenih projektih v računalniško berljivi obliki, kar poenostavi avtomatizirano preverjanje skladnosti modelov z zahtevami ter izboljša komunikacijo med deležniki. V študijah, ki so se pojavile v zadnjem času, prihaja do poskusov polavtomatske pretvorbe podatkov BIM v energijske modele stavb (BEM) z uporabo podatkov IFC, ustvarjenih iz podatkov oblaka točk, pridobljenih s skeniranjem stavb, z minimalnimi ročnimi posegi, osredotočenimi na odkrivanje in popraviljanje napak v geometriji BIM, kar olajša digitalizacijo stavb in ocenjevanje toplotne učinkovitosti v obstoječi pisarniški stavbi [Sayegh et al, 2024].

1.6 Cilj študije

Cilj študije je ugotoviti, ali so poti, ki vodijo do izračuna potreb po energiji, primerne tudi za obstoječe energetske zahtevne stavbe, ki predstavljajo pomemben del slovenskega stavbnega fonda, tudi tistega, ki je zaščiten kot kulturna dediščina. Pri izračunih smo upoštevali dostopni metodologiji in orodja za računanje po urni in mesečni metodi.

2 METODOLOGIJA

Na GF-izračun vpliva več dejavnikov, od katerih smo metodološko izpostavili tiste, prikazane na sliki 4. Podrobno so razloženi v naslednjih poglavjih.

2.1 Izbor referenčnega objekta za izračun

V Sloveniji je največji delež stanovanjskega stavbnega fonda zgrajen med letomoma 1971 in 1990 [Kotzeva & Brandmüller, 2016]. Kljub temu da je prevladujoča stanovanjska tipologija v tem prostoru enodružinska hiša, je za učinkovit zeleni preboj ključna pospešena energijska obnova večjih objektov iz tega obdobja. Pri tem niso ključni le večji prihranki zaradi večjega volumna objektov; velikost ima pozitiven vpliv tudi na časovnico prenove, saj se dokumentacija pripravlja enkrat za več bivalnih enot hkrati.

Izbran referenčni objekt (glej sliko 5) je energetsko zahteven večstanovanjski blok z več kot eno energetsko cono, ki lahko iz različnih vidikov služi za referenčni primer. Kljub temu da je bil referenčni objekt zgrajen desetletje prej, je bil zgled za objekte zgrajene v omenjenem obdobju. Posebnost objekta je, da je spomeniško zaščiten. Spomeniško varstvo omeju-

je posege v ovoj (med drugim zunanja senčila niso dovoljena, stavbno pohištvo mora biti poravnano z zunanjo ravnilo netransparentnih delov fasade). Osredotočili smo se na ovoj in vpliv le-tega na izračun energijske učinkovitosti stavbe, ne pa na medsebojni vpliv con (v tem primeru nadstropij). Zato smo izločili podstreho in pritličje in kot referenčno cono dolo-

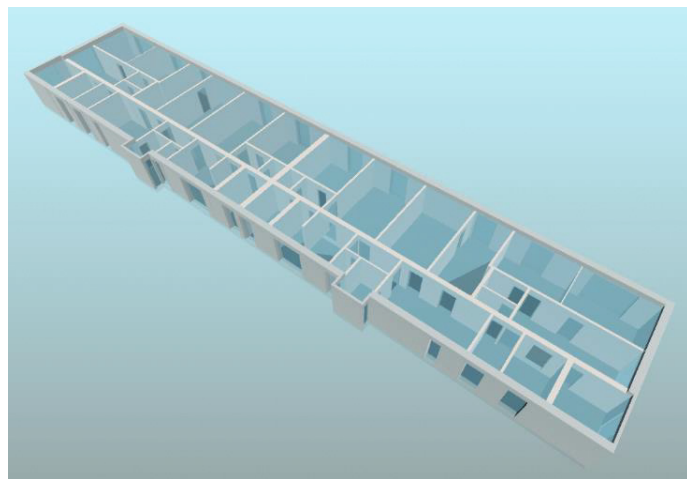
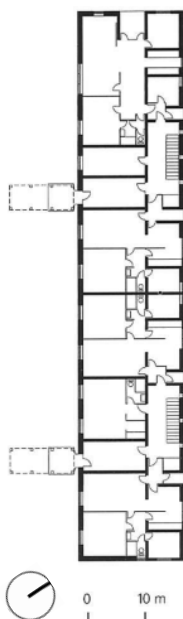
čili 1. nadstropje, ki reprezentira vsa vmesna nadstropja. Nadstropje obsega 345,7 m² neto tlorisne površine in 864,3 m³ neto volumna. Bruto gabarit stavbe je ca. 9,2 m x 45,7 m. Tipično nadstropje sestoji iz 6 bivalnih enot in 2 netemperiranih stopnišč. Ker stopnišča zajemajo manj kot 10 % skupne površine, se združi s sosednjo in tvori 1 cono. Analitični model cone (1. nadstropje večstanovanjske stavbe) je prikazan na sliki 6.



Slika 4. Shema definiranih vhodnih podatkov.



Slika 5. Tipologija analiziranega objekta ob izvedbi [Jerman, 2022].



Slika 6. Analitični model cone (1. nadstropje večstanovanjske stavbe).

2.2 Določitev načina uporabe stavbe

PURES-3 določa operative temperature glede na tip rabe objektov; stanovanjske stavbe (večstanovanjske stavbe CC – SI 112) morajo zagotavljati v času ogrevanja 20 °C, poslovne stavbe (npr. poslovne in upravne stavbe CC – SI 122) pa 22 °C. Primerna temperatura v bivalnih prostorih je ključna za zagotavljanje udobja stanovalcev. Raziskave kažejo, da se pri temperaturah med 20 °C in 24 °C večina ljudi počuti udobno. V naši raziskavi smo spodnjo mejo dvignili z 20 °C na 22 °C iz dveh razlogov. Prvi je pogosto delo od doma stanovalcev. Ker je delo od doma podobno tistemu v poslovnih stavbah in so ljudje pogosto dalj časa izpostavljeni notranjim temperaturam, je vzdrževanje temperature realno bližje zahtevam za poslovne stavbe. Drugi razlog je tako imenovani »energy performance gap«. Pričakovano je »rebound effect«, kjer je v energijsko učinkovitih stavbah izmerjena višja poraba od izračunane. Eden izmed razlogov za ta učinek so tudi drugačne uporabniške navade, kot je v izračunu predvideno [Hansen & Gram-Hanssen, 2023; Palladino, 2023]. V času hlajenja nismo odstopali od zahteve za večstanovanjske stavbe po PURES-3, kjer je meja pri 26 °C. Osnovni parametri za izračune po scenarijih so navedeni v preglednici 1.

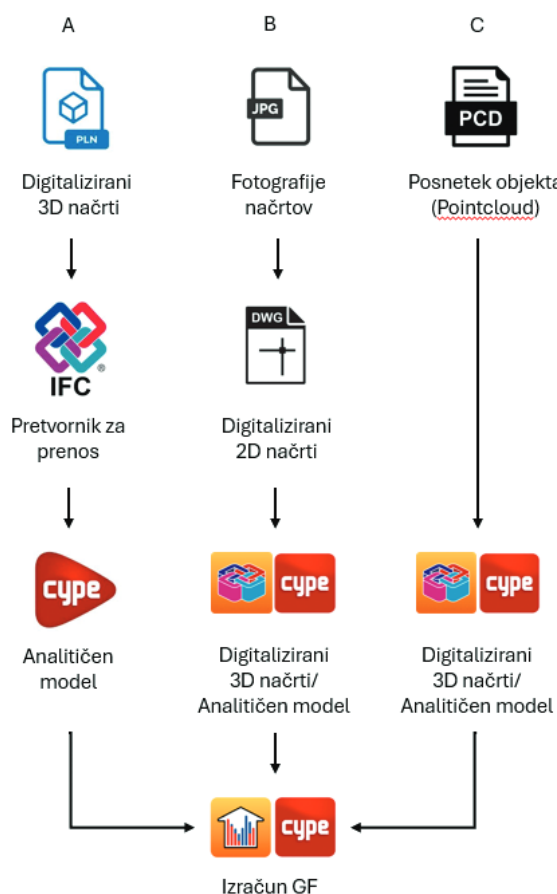
2.3 Prenos osnovne geometrije

Shema priprave in prenosa podatkov za analizo rabe energije v stavbi, ki je osnova za metodologijo te raziskave, je predstavljena na sliki 7. Pri prenosu geometrijskih podatkov o stavbi (površina, volumen ipd.) smo pri računanju z mesečno metodo podatke prenašali ročno, kot je to običajno pri izmenjavi med projektantom in izdelovalcem elaborata GF, in ne s prenosom

notranja operativna temperatura (ogrevanje)	θ _{op}	°C	22
notranja operativna temperatura (hlajenje)	θ _{op}	°C	26
notranji viri - povprečna vrednost (uporabnik, naprave, razsvetljava)	q _s	W/m ²	3,7
prezračevanje			naravno
št. izmenjav zraka (pozimi)	n	h-1	0,5
št. izmenjav zraka (poleti)	n	h-1	0,5
tedenska uporaba stavbe	tt	d/teden	7
dnevna uporaba stavbe	td	h/dan	24
letno št. dni koriščenja	da	d/an	365
faktor sočasne uporabe stavbe	fu	-	1

Preglednica 1. Osnovni parametri za izračune po scenarijih.

vrednosti iz 3D-modela. Iz razloga posplošitev podatkov pri ročnem vnosu, deloma tudi na račun prostora, ki nastane zaradi poravnanosti oken z zunanjo ravnino ovoja, lahko pride do



Slika 7. Shema priprave in prenosa podatkov za analizo energijske učinkovitosti.

neskladij. Ker urna metoda svoje podatke o geometriji prevzame iz 3D-modela, je ogrevan volumen večji kot tisti, izvzet iz seznama neto tlorisnih površin, ki jih povzema mesečna metoda. Da bi dosegli čim bolj primerljive rezultate potencialnih neskladij, pri prenosu geometrijskih karakteristik nismo upoštevali. Uporabljeni podatki o površini in volumnu so identični.

V nadaljevanju so opisane 3 različne poti prenosa podatkov za izračun energijske učinkovitosti v CYPE Thermal po urni metodi. Izmed 3 opisanih smo preizkusili poti A in B. Izračuni za referenčni objekt so bili narejeni po poti B. Izračun po mesečni metodi je bil opravljen s programskim orodjem za izračun energijske učinkovitosti stavb (posodobljena verzija V.170 z dne 23. 10. 2023) po PURES-3.

2.3.1 Pot A (Prenos podatkov iz digitaliziranega 3D-načrta z IFC-vmesnikom)

Objekt, obravnavan v naši raziskavi, je v uporabi že več desetletij in nima izdelanega BIM-modela. Za namen raziskave smo BIM-model pripravili v programskem okolju ArchiCAD (PLN-datoteka) in prevedli v IFC-datoteko, ki je namenjena prenašanju podatkov med programskimi okolji. Preden je IFC-datoteka pripravljena za analizo v CYPE Thermal, je treba pripraviti CYPE "analitičen" model z vmesnikom od CYPE. V tej fazi se strukturirani podatki v IFC-datoteki prilagodijo za analizo. Iz večplastnih obodnih elementov sta generirani dve ploskvi. Ploskev, ki meji na netemperirano okolico, in ploskev, ki meji na notranji (temperiran) prostor. Podoben proces je uporabljen pri oknih in vratih, le da je pri stavbnem pohištvo pomembna lega le-teh (bližje zunanji ploskvi ali bližje notranji ploskvi) zaradi kasnejše simulacije vpada sonca in senčenja. Za analizo je potrebna definicija posameznih prostorov za zajemanje osnovnih geometrijskih podatkov (površina, volumen, ovoj). Analiza je mogoča, ko so vsi elementi pretvorjeni v za CYPE Thermal sprejemljivo obliko. V nadaljevanju se v CYPE Thermal vnesejo vse relevantne karakteristike objekta za izračun.

2.3.2 Pot B (Priprava podatkov iz tiskane arhivske dokumentacije)

Večina obstoječih objektov ni digitalizirana in zanje obstaja malo uporabne dokumentacije. Velikokrat obstajajo idejni načrti, ki odstopajo od izvedenega stanja, saj so bile že v času izgradnje izvedene variante tistega opisanega v prvotnih načrtih. Med uporabo stavbe se zgodijo spremembe znotraj posameznih stanovanj (premiki predelnih sten, posegi na fasadi, balkonih ipd.), kar ima lahko vpliv na izračun energijske učinkovitosti objekta. Za dobro analizo so zelo pomembne karakteristike materialov, s katerimi je bil objekt zgrajen. Tovrstni podatki so običajno za obstoječe objekte pomanjkljivi. Priporočljivo je lokalno sondiranje osnovnih gradbenih materialov, kar pa ni običajna praksa pri ugotavljanju obstoječega stanja. Tudi če se jemanje vzorcev na mestu samem izvede, lahko vseeno pride do napak, na primer, če se je v času gradnje tip materiala ali način gradnje spreminjal iz etaže v etažo ali med posameznimi enotami. Iz podobnih razlogov je izračun energijske učinkovitosti obstoječe stavbe v veliki meri odvisen od predvidevanj/predpostav o karakteristikah materialov, ki jih predvideva izdelovalec izračuna. To pa pred-

stavlja velik potencial za razlike med simuliranimi izračuni in dejansko porabo.

Opisan način prenosa je najbolj primeren za obstoječe stavbe z nedigitalizirano projektno dokumentacijo. Začetek priprave in prenosa podatkov se lahko prične kasneje in ne nujno s fotografijami načrtov objekta. Iz fotografij se pripravijo podloge 2D-načrtov za izdelavo 3D-modela v programski opremi CYPE IFC Builder. Za razliko od IFC-datoteke, generirane v drugih programskih orodjih, IFC Builder omogoča pripravo IFC-datoteke, ki je že ustrezna za analizo. Tako priprava analitičnega modela ni potrebna, analiza modela je mogoča takoj, ko je vzpostavljen 3D-model. V nadaljevanju se v CYPE Thermal vnesejo vse relevantne karakteristike objekta za izračun.

2.3.3 Pot C (Geodetski posnetek objekta z zajemom točk kot osnova za model)

Če o obstoječem objektu ni razpoložljivih načrtov, je treba pripraviti posnetek obstoječega stanja. Če je iz zunanosti objekt dostopen relativno dobro, je z zajemom oblaka točk Point Cloud posnetek fasade/ovoja pripravljen hitro. Z razpolaganjem z osnovnimi višinami in razporeditvijo prostorov po tlorisu je potreben posnetek tudi v notranjosti. Oblak točk PTX ali PTS-format je mogoče uvoziti v IFC Builder in ponoviti postopek, opisan v poti B.

2.4 Orientacija, vremenski podatki, toplotni mostovi

Mesečna metoda uporablja 8 različnih smeri orientacije objekta (delitev obzorja na 8 segmentov) (S, SV, V, JV, J, JZ, Z, SZ). Orientacija objekta je določena na 45° natančno. Ker urna metoda izvede simulacijo na podlagi 3D-modela objekta, je orientacija določena na 1° natančno. Ker je orientacija našega testnega objekta 38° odklona od severa, je bilo odstopanje (7°) sicer manjše, kot je največje mogoče, če je objekt orientiran npr. 22,5°.

Za izračune energijske učinkovitosti stavbe po PURES-3 so za obe metodi na voljo vremenski podatki okolice v različnih oblikah (mesečni, urni) za različna obdobja in drugačno dolžino referenčnega obdobja. Podatki za mesečno metodo izhajajo iz 30-letnega referenčnega obdobja med letoma 1971 in 2000. Izvzeti so bili iz podatkovne baze Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). Za urno metodo so vremenski podatki pripravljeni iz časovnih nizov po prilagojeni metodi Sandia [Marion & Urban, 1995], kjer je značilno meteorološko leto sklop 12 mesecev običajnega vremena v nekem kraju in obdobju. Referenčno obdobje je krajše in je zajeto med letoma 2001 in 2015 in je na voljo v podatkovni bazi ARSO. Za namene raziskave so bili vremenski podatki izvzeti iz podatkovne baze EnergyPlus v obliki EPW [EnergyPlus, 2024].

Izbrali smo povprečno vrednost toplotnih mostov $\Delta\psi_{tb} = 0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$ za boljšo primerjavo med metodama pri vhodnih podatkih za mesečno metodo. Pri izračunu po urni metodi orodje analizira 3D-model, na podlagi katerega se pripravi izračun. V modelu je bilo identificiranih 112 toplotnih mostov. Programsko orodje omogoča izbiro metode za izračune toplotnih mostov. Za izveden izračun je bil izbran standard ISO 14863. Povprečne vrednosti identificiranih toplotnih mostov za izračun po urni metodi so bile $\Delta\psi_{tb} = 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$.

2.5 Definicija scenarijev

Definicija spremenljivk pri izračunih po scenarijih je zbrana v preglednici 2. Določeni štirje scenariji so poimenovani s S za scenarij in zaporedno št. 1–4. Zapisu za scenarij sledi metoda (M – mesečna metoda, U – urna metoda). Vsi scenariji so bili izračunani z mesečno in urno metodo. S1 (scenarij 1) obravnava obstoječe stanje stavbe. Ovoj stavbe (netransparentna konstrukcija in transparentna konstrukcija) je v originalnem stanju. Ker ni bilo razpoložljivih podatkov o vgrajenih materialih, so bile ocenjene predpostavke – ZS-1 (zunanja stena 1) na podlagi takrat vgrajenih materialov. S2 (scenarij 2) obravnava stavbo z izboljšanim ovajem ZS-2 (zunanja stena 2). Netransparentni konstrukciji se na zunanji strani doda toplotna izolacija – 16 cm mineralne kamene volne. Stavbno pohištvo se zamenja s sodobnim (z nižjim količnikom prehoda toplote – Uw). S3 (scenarij 3) ima za razliko od S2 senčene transparentne dele stavbnega ovoja. $F_{sh}=0,1$. Izračunana je bila tudi varianta S3.Ua, kjer smo določili urnik za spuščanje senčil, in sicer se senči med 10.00 in 17.00. S4 (scenarij 4) se ne senči z zunanjimi senčili, temveč ima za razliko od S2 izboljšano energijsko prehodnost zasteklitve za skladnost s pogoji zavoda za varstvo kulturne dediščine. Definicija spremenljivk pri izračunih po scenarijih za materiale je zbrana v preglednici 3.

Scenarij in metoda			S1.M/U	S2.M/U	S3.M/U	S3.Ua (urnik)	S4.M/U
netransparentna konstrukcija	tip		ZS-1	ZS-2	ZS-2	ZS-2	ZS-2
netransparentna konstrukcija	U	W/m ² K	1,244	0,177	0,177	0,177	0,177
transparentna konstrukcija	tip		TG-1	TG-2	TG-3	TG-3	TG-4
transparentna konstrukcija	Uw	W/m ² K	1,32	0,92	0,92	0,92	0,92
energijska prehodnost zasteklitve	gtot	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3
faktor senčenja zunanjih in notranjih senčil	Fsh	-	1	1	0,1/-		1
čas senčenja (meseči)			-	-	maj-sept	maj-sept	-
čas senčenja (ura)			-	-	0.00-24.00	10.00-17.00	-

Preglednica 2. Definicija spremenljivk pri izračunih po scenarijih.

			d	λ	ρ	c_p	μ	$R\lambda$	sd
			cm	W/mK	kg/m ³	J/kgK	-	m ² K/W	m
ZS-1	Malte	Apnena malta	2,5	0,81	1600	1050	10	0,021	0,2
	Zidovi	Polna opeka (1600)	37	0,64	1600	920	9	0,58	3,33
	Malte	Apnena malta	2,5	0,81	1600	1050	10	0,034	0,25
ZS-2	Malte	Apnena malta	2,5	0,81	1600	1050	10	0,021	0,2
	Zidovi	Polna opeka (1600)	37	0,64	1600	920	9	0,58	3,33
	Malte	Apnena malta	2,5	0,81	1600	1050	10	0,03	0,25
	Toplotni izolatorji	Mine-ralna kamena volna (100)	16	0,033	100	1030	1,0	4,85	0,160

Preglednica 3. Predpostavljeni gradniki ZS (zunanjih sten).

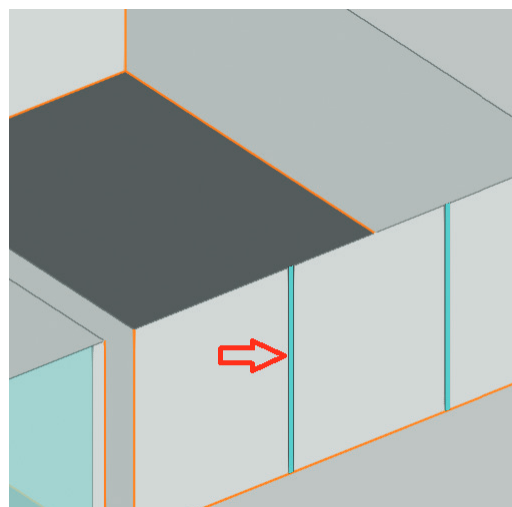
3 REZULTATI

V nadaljevanju predstavljamo rezultate analize, ki vključuje prenos podatkov in pripravo modela, ter primerjamo letne potrebe po energiji za ogrevanje in hlajenje med različnimi scenariji (S2-S4) in originalnim stanjem (S1), ob tem pa se osredotočamo tudi na vpliv solarnih dobitkov, izračunanih z urnimi in mesečnimi metodami.

3.1 Prenos podatkov in priprava modela za analizo

Izbira poti (Pot A, Pot B, Pot C) je odvisna od razpoložljivih vhodnih podatkov. Pri poti A smo ugotovili, da je kljub izdelanemu BIM-modelu potrebno precej pripravljalnega dela pred analizo. Natančnost programske opreme in priprava osnovnega BIM-modela sta ključna za izračun GF. V našem modelu so se pojavile težave pri stavbnem pohištvu (glej sliko 8), kjer je bilo treba ročno popraviti približno 20 % elementov zaradi minimalnih toleranc. Pri pripravi IFC-datoteke je pomembno, da je model izvožen na nižjem nivoju (LOD 3), saj zapletene fasadne konstrukcije in tehnična oprema niso potrebne za analizo. To otežuje prenos podatkov, saj izvajalci energijskih analiz pogosto nimajo dostopa do zahtevne programske opreme projektantov in potrebujejo le osnovno 3D geometrijo stavbe.

Za pot A smo izdelali BIM-model objekta v ArchiCAD-u ter ga prenesli v IFC-datoteko, pri čemer je bilo pred analizo v CYPE Thermal treba prilagoditi strukturirane podatke iz IFC za ustvarjanje analitičnega modela, ki vključuje generacijo dveh ploskev iz večplastnih obodnih elementov, in definicijo posameznih prostorov za zajem osnovnih ge-



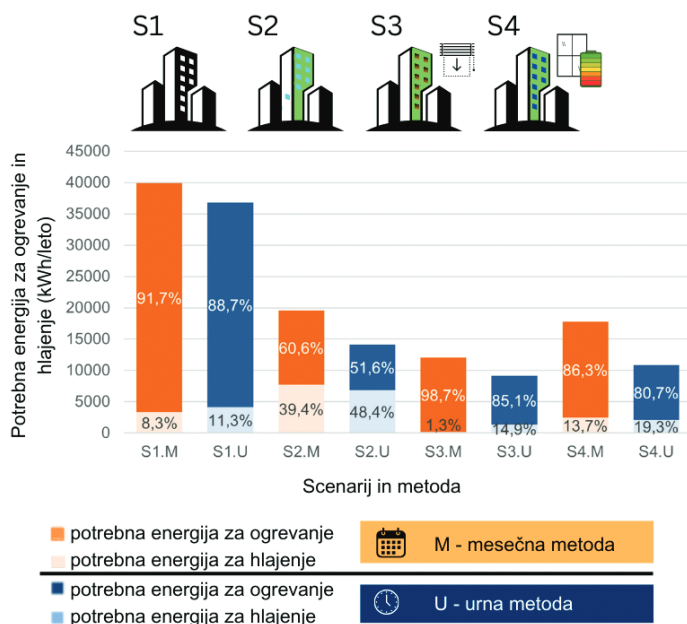
Slika 8. Prikaz neidentificiranega stavbnega pohištv pri izdelavi analitičnega modela iz IFC.

ometričnih podatkov. Rezultat študije je, da pri izmenjavi podatkov prihaja do izgube informacij, ki so že na voljo v IFC-modelu, kar otežuje pričakovano dvosmerno izmenjavo. CYPE Thermal sicer uporablja 3D-model, vendar ga poenostavi, ko za analizo kreira dve ploskvi iz večslojnih elementov. Ploskvam se pripišejo numerične vrednosti lastnosti materialov, geometrične definicije pa se zavrnejo. Robni pogoji, kot sta orientacija in klima, neposredno vplivajo na geometrični model, medtem ko debeline slojev in karakteristike materialov vplivajo posredno preko numeričnih vrednosti v programski opremi. Pot B je zajemala pripravo 2D-načrtov iz fotografij za izdelavo 3D-modela v CYPE IFC Builder, brez priprave analitičnega modela, saj se vse relevantne karakteristike vnesejo neposredno v CYPE Thermal. Ta pot se zdi dolgotrajna in vključuje več programskih orodij, a omogoča uporabo relevantnih podatkov ter izloča nepotrebne informacije. Potrebno je oceniti, ali je smiselno ustvariti lasten model za analizo ali raje uporabiti obstoječega, ki ga pripravi projektant. Pot C se lahko uporabi, ko je za obstoječe objekte skorajda ni razpoložljive dokumentacije in je nujno opraviti terenske izmere. Zaradi manjšega števila preskokov med programsko opremo so težave z izgubljenimi podatki ali definiranjem pretvornikov minimalne. Ta pot zahteva največ znanja s področja BIM-tehnologij ter upravljanje zajetih točk, kar vključuje tudi geodezijo.

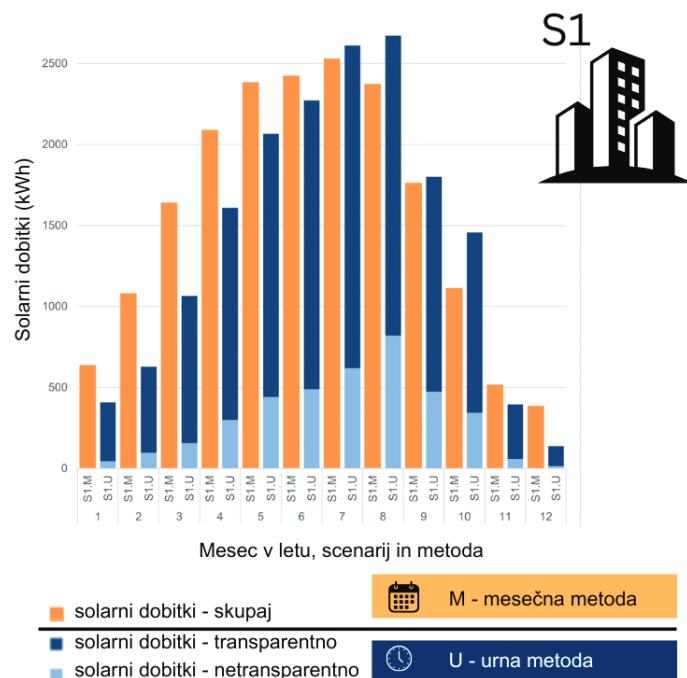
3.2 Primerjava rezultatov scenarijev S2-S4 z originalnim stanjem v scenariju S1

Vsi scenariji temeljijo na izhodiščnem scenariju S1 za obe metodi (mesečno in urne). V grafikonih so izračuni po mesečni metodi prikazani z oranžno, po urni metodi z modro, rezultati v rdeči pa predstavljajo vmesno preveritev scenarija 3 glede na senčenje (10.00-17.00) in brez senčenja (0.00-24.00). Povzetek vseh rezultatov za štiri scenarije je prikazan na sliki 9. Scenariji S2 do S4 bistveno znižajo potrebo po energiji za ogrevanje in hlajenje v primerjavi z originalnim stanjem S1 (glej sliko 9). Pri scenariju S2 (izbolšan ovoj) se energijska potreba zmanjša za 51 % (mesečna metoda) in 62 % (urna metoda). Scenarij S3 (izbolšan ovoj + zunanje senčenje) doseže največje prihranke, saj se potreba zmanjša za 70 % (mesečna) in 85 % (urna).

Ker zunanja senčila pri spomeniško zaščitenem objektu niso dovoljena, smo izračunali še scenarij S4 (izboljšan ovoj + izboljšana energijska prehodnost zasteklitve), pri čemer se energijska potreba zmanjša za 55 % (mesečna) in 70 % (urna). Razlike med metodama so najmanjše pri S1, kjer je urna metoda 8 % bolj optimistična, in največje pri S4, kjer je urna metoda 39 % bolj optimistična od mesečne (glej sliko 9).



Slika 9. Primerjava letnih potreb po energiji za ogrevanje in hlajenje za 4 scenarije, računanje z urno in mesečno metodo.



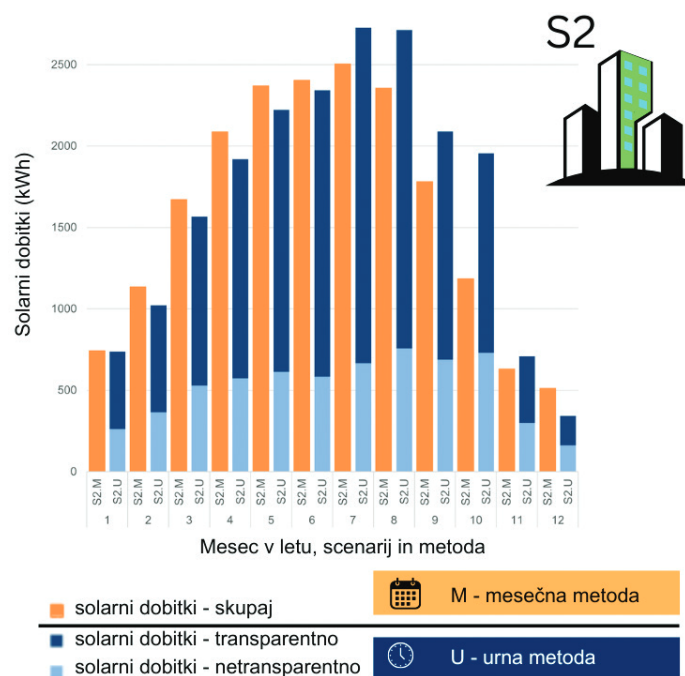
Slika 10. Primerjava solarnih dobitkov, izračunanih z urno in mesečno metodo za scenarij S1 (originalno stanje).

3.3 Vpliv izračuna solarnih dobitkov na potrebo po energiji

Primerjava solarnih dobitkov, izračunanih z urno in mesečno metodo za scenarij S1, je na sliki 10, za S2 je na sliki 11, za S3 je na sliki 12 in za S4 je na sliki 13.

Scenarij S2 (izboljšan ovoj) prinaša večje solarne dobitke v primerjavi s S1 (originalno stanje), pri čemer je razlika po mesečni metodi 3 % in po urni metodi 16 %. Pri S2 se v zimskem času, zlasti v januarju, solarni dobitki po urni metodi povečajo za 45 %, medtem ko poleti, v juliju, le za 4 %. Pri mesečni metodi so razlike manjše, saj januar prinaša 15 % in julij -1 %.

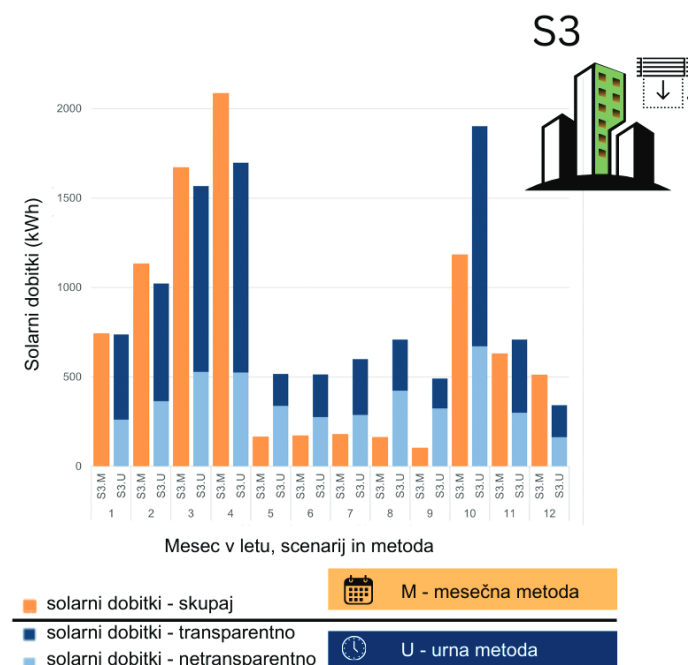
Pri scenariju S4 (izboljšan ovoj + izboljšana energijska prehodnost zasteklitve brez senčil, glej sliko 13), izboljšana energijska prehodnost stekel pozitivno vpliva na solarne dobitke poleti, medtem ko v zimskem času zmanjša dobitke skozi transparentne materiale, kar negativno vpliva na ogrevanje. Skupna potrebna energija za ogrevanje in hlajenje je v tem scenariju za 23 % nižja kot v S2, pri čemer je razmerje potrebne energije za ogrevanje in hlajenje pri S2 50/50, pri S4 pa 80/20 (glej sliko 9).



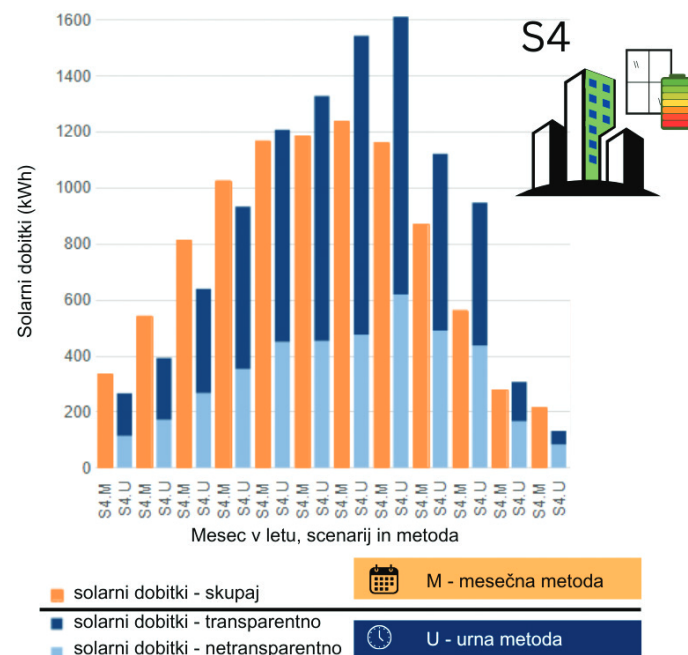
Slika 11. Primerjava solarnih dobitkov, izračunanih z urno in mesečno metodo za scenarij S2.

Primerjava solarnih dobitkov med scenarijem S3 (izboljšan ovoj + zunanje senčenje) in S3a (izboljšan ovoj + zunanje senčenje po urniku od 10. do 17. ure) je prikazana na sliki 14. Scenarij S3 zahteva najmanj energije v primerjavi z originalnim stanjem (glej sliko 9), pri čemer mesečna metoda predvideva minimalno hlajenje, ki znaša več kot 1 % potrebne energije, medtem ko urni izračun za hlajenje predvideva 15 % (glej sliko 9). Skupna potrebna energija je sicer primerljiva, a se večja odstopanja pojavijo pri razporeditvi porabe čez leto; urna metoda predvideva manjšo porabo pozimi, medtem ko poleti zaradi višjih

solarnih dobitkov napoveduje večjo potrebo po hlajenju v primerjavi z mesečno metodo.



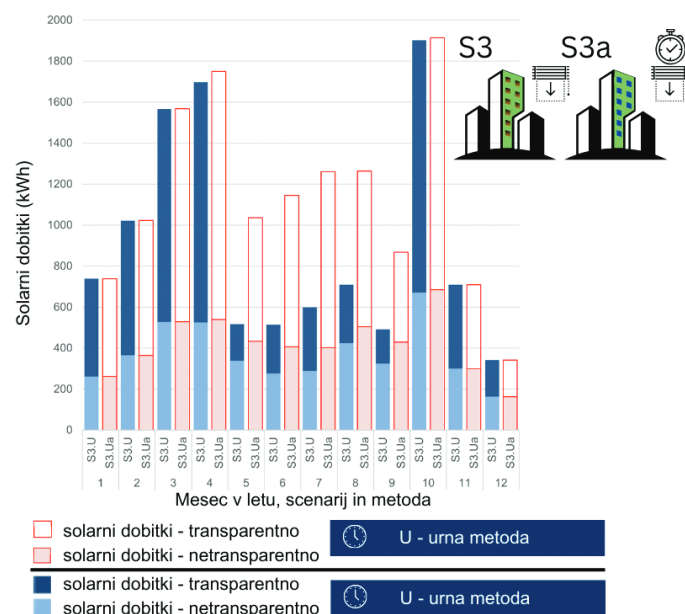
Slika 12. Primerjava solarnih dobitkov, izračunanih z urno in mesečno metodo za scenarij S3 (izboljšan ovoj + zunanje senčenje).



Slika 13. Primerjava solarnih dobitkov, izračunanih z urno in mesečno metodo za scenarij S4 (izboljšan ovoj + izboljšana energijska prehodnost zasteklitve).

Za preveritev vpliva solarnih dobitkov na izračun potreb po energiji smo dodali varianto scenarija S3a (izboljšan ovoj + zu-

nanje senčenje od 10. do 17. ure) na sliki 14. Kljub temu da se ne senči zjutraj in popoldan, imajo solarni dobitki v tem času pomemben vpliv; med senčenjem so dobitki približno 50 % višji, kar negativno vpliva na potrebe po energiji. Scenarij S3a zaradi manj senčenja predvideva skupno 10 % več potrebne energije.



Slika 14. Primerjava solarnih dobitkov med scenarijem S3 (izboljšan ovoj + zunanje senčenje) in scenarijem S3a (izboljšan ovoj + zunanje senčenje, 10.00–17.00), izračunano z urno metodo.

4 DISKUSIJA

V okviru naše študije smo potrdili ugotovitve, navedene v prispevku avtorjev Sayegha in drugi (2024), ki poudarjajo vlogo BIM pri lažji digitalizaciji stavb in izboljšanju vrednotenja energijske učinkovitosti. Pri naši študiji smo se osredotočili na uporabo programske opreme CYPE Thermal, ki omogoča analizo energijske učinkovitosti po urni metodi, podprti z BIM. Ta pristop omogoča natančnejše ocene potreb po energiji, saj črpa podatke iz 3D-modela, kar zmanjšuje izgubo informacij o geometriji. V nasprotju z mesečno metodo, ki zahteva dva ločena izračuna za ogrevanje in hlajenje ter temelji na povprečnih vrednostih, urna metoda omogoča enoten izračun in boljše preglednost, saj upošteva vremenske podatke v realnem času. Naša analiza potrjuje ugotovitve prejšnjih raziskav, ki so pokazale prednosti urne metode pri oceni energijske učinkovitosti (Borralló-Jiménez et al., 2022; Gangolells et al., 2020).

Urna metoda omogoča dinamično prilagajanje zasnove stavbe in optimizacijo energijske učinkovitosti skozi celoten proces načrtovanja. S tem se povečujeta fleksibilnost in kakovost končnega izdelka ter zmanjšujejo tveganja za napake zaradi pomanjkljivih informacij. Poleg tega je z uporabo BIM-modela mogoče hitro identificirati kritične prostore v kompleksnih stavbah in ponuditi izboljšave, kar je še posebej pomembno v

luči ostrejših zahtev PURES-3. Takšna analiza omogoča boljše razumevanje vplivov toplotne mase, prezračevanja in sončnih dobitkov ter prispeva k bolj trajnostnim rešitvam v gradbeni industriji.

Raziskava avtorjev Sayegha in drugi (2024) poudarja nujnost natančnega prenosa podatkov in priprave modela, kar se ujema z našimi ugotovitvami. Naša študija o prenosu podatkov s pomočjo BIM in pripravi modela za analizo razkriva, da izbira poti (Pot A, Pot B, Pot C), močno vpliva na natančnost in učinkovitost izračunov energijske učinkovitosti. Pri Poti A smo ugotovili, da je kljub izdelanemu BIM-modelu potrebno obsežno pripravljeno delo in prilagoditve, kar lahko vodi do izgube informacij v procesu prenosa, medtem ko Pot B omogoča neposredno vnos relevantnih podatkov, vendar vključuje več programskih orodij, kar lahko podaljša čas izračuna; Pot C pa se izkaže za najprimernejšo izbiro v primerih z omejeno dokumentacijo. Pri pripravi datoteke za analizo je ključno, da je model, tudi če je projekt že v izvedbeni fazi, izvožen na bistveno nižjem nivoju (LOD 3). Določeni robni pogoji (orientacija, klima ipd.) vplivajo na geometrični model, spet drugi (debelina slojev, karakteristike vgrajenih materialov) pa vplivajo na numerične vrednosti za izračun. To ima tako pozitivne kot negativne vplive na izračun energijske učinkovitosti stavbe, saj omejuje dvosmerno izmenjavo podatkov, a omogoča enostavnejše prilagoditve programske opreme glede na specifično nacionalno zakonodajo, kot je slovenska. Brez rabe BIM lahko za eno energetsko cono ročno vnesemo podatke v tabelo za izračun za največ 50 gradbenih elementov, kar lahko hitro postane omejitev pri večjih projektih. Globalne spremembe gradbenih elementov, kot je energijska prehodnost stekla za vsa okna, niso možne. Mesečni izračun porabe energije zahteva dva ločena izračuna za ogrevanje in hlajenje, kar otežuje preglednost, še posebej v prehodnih obdobjih spomladi in jeseni, ko so temperaturna nihanja večja. V teh primerih je edini relevantni vhodni podatek povprečna temperatura okolice za mesec, kar lahko vodi do manj natančnih rezultatov.

Kot so pokazale prejšnje študije, na primer Di Giuseppe et al. (2019), mesečna metoda pogosto privede do netočnosti, saj lahko podceni ali preceni porabo energije, zlasti v zimskih mesecih, kjer so razlike med metodama lahko tudi do 100 %. Urna metoda, ki vključuje natančne vremenske podatke, omogoča bolj podrobno in dinamično oceno potreb po ogrevanju in hlajenju. Kljub temu pa obstajajo tudi pomanjkljivosti urne metode (De Luca et al., 2021). Podobno potrjuje tudi uvedba izboljšav urne metode v Italiji, kot je prikazano v nacionalnem standardu z dodatkom A.

V naši študiji smo skladno z ugotovitvami drugih avtorjev potrdili pomembne razlike med mesečno in urno metodo pri oceni potreb po energiji. Pri mesečni metodi je scenarij S2 dosegel zmanjšanje potrebne energije za 51 %, medtem ko je scenarij S3 dosegel 70% zmanjšanje. V nasprotju s tem je urna metoda pokazala še večje prihranke, pri čemer je S2 znižal potrebo po energiji za 62 %, S3 pa za kar 85 %. Te razlike potrjujejo, da urna metoda omogoča natančnejše ocene energijske učinkovitosti, saj upošteva časovne spremembe v rabi energije in solarnih dobitkih, kar je v skladu s standardom ISO 52016-1, ki je na-

prednejši od svojega predhodnika ISO 13790:2008 in se osredotoča na dinamične učinke ter vpliv prilagodljivih fasadnih elementov.

Mesečna metoda, ki temelji na povprečnih vrednostih, omogoča splošno oceno energijske učinkovitosti stavbe, a ne upošteva dnevnih in sezonskih nihanj, kar lahko privede do manj zanesljivih rezultatov. Nasprotno pa urna metoda omogoča natančnejšo analizo solarnih dobitkov na podlagi konkretnih vremenskih podatkov v realnem času, kar je še posebej koristno pri oceni vpliva transparentnih gradnikov v poletnih mesecih. Pri vrednotenju energijske učinkovitosti stavbe po PURES-3 je pomembno upoštevati različno obdobje vremenskih podatkov: mesečna metoda uporablja 30-letno obdobje (1971–2000), medtem ko urna metoda temelji na podatkih od leta 2001 do leta 2015. Potrebna bi bila ločena študija za natančnejšo analizo tega vpliva, saj bodo vremenski podatki, ob upoštevanju globalnih podnebnih sprememb, postali še pomembnejši.

5 SKLEP

Naša raziskava se osredotoča na izzive, povezane z vpeljavo dinamične urne metode za izračun energijske učinkovitosti stavb, ki bo zamenjala mesečno metodo ob hkratni vpeljavi obvezne rabe BIM v projektiranju. Ključni dejavniki študije so metodologija priprave in prenosa podatkov v BIM okolju, vpliv vhodnih podatkov ter izračun solarnih dobitkov in senčenja transparentnih delov stavbnega ovoja na primeru zahtevnega objekta, ki je ščiten kot kulturna dediščina. Ugotovili smo, da izbira poti za analizo (Pot A, Pot B, Pot C) temelji na kakovosti vhodnih podatkov, starosti in tipologiji stavbe ter sodelovanju projektne skupine. Analizirali smo štiri scenarije stanja stavbnega ovoja (S1 do S4), pri čemer so rezultati pokazali pomembne razlike med urno in mesečno metodo izračuna rabe energije za ogrevanje in hlajenje. Scenarij S1 predstavlja obstoječe stanje, medtem ko scenariji S2 (izboljšan ovoj), S3 (izboljšan ovoj + zunanje senčenje) in S4 (izboljšan ovoj + izboljšana energijska prehodnost zasteklitve) bistveno zmanjšujejo potrebo po energiji za ogrevanje in hlajenje. Pri mesečni metodi sta tako scenarij S2 kot S3 dosegla zmanjšanje potrebne energije glede na S1. V nasprotju s tem je urna metoda pokazala še večje prihranke. Te razlike nakazujejo, da urna metoda omogoča natančnejše ocene energijske učinkovitosti, saj upošteva časovne spremembe v rabi energije in solarnih dobitkih. Rezultati naše študije kažejo tudi, da je avtomatsko senčenje najbolj učinkovito za dosegel najnižje rabe energije. Opazili smo napredek v integraciji BIM-procesov, uporaba BIM v kombinaciji s PURES 3 prinaša številne prednosti, zlasti pri hitrosti priprave in natančnosti izračunov. Glede na to, da se bo delež projektne dokumentacije v BIM okolju zaradi zavez v GZ-1 povečal, predstavlja hitrejša izmenjava podatkov dobrodošlo spremembo pri računanju GF po novem PURES-3. Uporaba CYPE Thermal med drugim omogoča bolj natančno simuliranje senčenja. Nova priporočila za naravno osvetljevanje zahtevajo večje transparentne površine, kar vpliva na solarne dobitke in rabo energije. Zaključujemo, da je integracija BIM ključna za učinkovito analizo energijske učinkovitosti obstoječih stavb ter ohranjanje njihove kulturne vrednosti. Uporaba

ustreznih metodologij omogoča natančnejše izračune in lažje obvladovanje kompleksnosti pri prenovi stavbnega fonda ter zagotavlja trajnostnost objektov in smotrno rabo energije v njih.

6 ZAHVALA

Predstavljeni rezultati so pridobljeni v sklopu dela infrastrukturne skupine Preizkušanje materialov in konstrukcij (ARIS IO-0032) in programske skupine Gradbeni objekti in materiali (ARIS P2-0273). Za finančno pomoč se ji iskreno zahvaljujemo. Hvala Katji Žagar za pripravo podatkov objekta, ki je bil pomemben vmesni korak za razumevanje problematike prenosa podatkov v BIM-okolju.

7 LITERATURA

Agencija Republike Slovenije za okolje, (n.d.-a), Podatki za pravilnik o učinkoviti rabi energije, Retrieved December 18, 2024, from <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/pravilnik-ucinkoviti-rabi-energije/>

Agencija Republike Slovenije za okolje, (n.d.-b), Značilno meteorološko leto, Retrieved December 18, 2024, from https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/test_ref_year/

Bansal, N. K., Bhandari, M. S., Comparison of the periodic solution method with TRNSYS and SUNCODE for thermal building simulation, *Solar Energy*, 57(1), 9-18, [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(96\)00039-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(96)00039-4), 1996.

Borralló-Jiménez, M., LópezDeAsiain, M., Esquivias, P. M., Delgado-Trujillo, D., Comparative study between the Passive House Standard in warm climates and Nearly Zero Energy Buildings under Spanish Technical Building Code in a dwelling design in Seville, Spain, *Energy and Buildings*, 254, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111570>, 2022.

De Luca, G., Bianco Mauthe Degerfeld, F., Ballarini, I., Corrado, V., Accuracy of simplified modelling assumptions on external and internal driving forces in the building energy performance simulation, *Energies*, 14(20), <https://doi.org/10.3390/en14206841>, 2021.

Di Giuseppe, E., Ulpiani, G., Summa, S., Tarabelli, L., Di Perna, C., D'Orazio, M., Hourly dynamic and monthly semi-stationary calculation methods applied to nZEBs: Impacts on energy and comfort, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 609). Institute of Physics Publishing, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/7/072008>, 2019.

Directive - EU - 2024/1275 - EN - EUR-Lex, (n.d.), Retrieved December 18, 2024, from https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive

EnergyPlus, Weather Data Download - Ljubljana 130140 (IWECC), Retrieved December 18, 2024, from https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/SVN/SVN_Ljubljana.130140_IWECC

[net/weather-location/europe_wmo_region_6/SVN/SVN_Ljubljana.130140_IWECC](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/SVN/SVN_Ljubljana.130140_IWECC)

Gangoles, M., Casals, M., Ferré-Bigorra, J., Forcada, N., Macarulla, M., Gaspar, K., Tejedor, B., Office representatives for cost-optimal energy retrofitting analysis: A novel approach using cluster analysis of energy performance certificate databases, *Energy and Buildings*, 206, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109557>, 2020.

Hansen, A. R., Gram-Hanssen, K., Over- and underconsumption of residential heating: Analyzing occupant impacts on performance gaps between calculated and actual heating demand, In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2654). Institute of Physics, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2654/1/012062>, 2023.

International Organization for Standardization, ISO 15927-4:2005 - Hygrothermal performance of buildings — Calculation and presentation of climatic data — Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling, Retrieved December 18, 2024, from <https://www.iso.org/standard/41371.html>, 2005.

International Organization for Standardization, ISO 16739-1:2024 - Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema, Retrieved December 18, 2024, from <https://www.iso.org/standard/84123.html>, 2024.

Jeong, Y.-S., Cho, S., Moon, S.-H., Potential Reduction of Greenhouse Gas Emissions for Buildings by Renewable Energy, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 41(6), 73-84, <https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.6.073>, 2021.

Jerman, L., Stoletje Stanka Kristla – Outsider – revija, ki presega meje, Retrieved December 18, 2024, from <https://outsider.si/stoletje-stanka-kristla/>, 2022.

Kotzeva, M. M., Brandmüller, T., Statistical Office of the European Communities., Urban Europe : statistics on cities, towns and suburbs, Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/7596823/KS-01-16-691-EN-N.pdf/0abf140c-ccc7-4a7f-b236-682effcde10f?t=1472645220000>, 2016.

Marion, W., Urban, K.: User's Manual for Derived from the 1961-1990 National Solar Radiation Data Base, 1995.

Mazzarella, L., Scoccia, R., Colombo, P., Motta, M., Improvement to EN ISO 52016-1:2017 hourly heat transfer through a wall assessment: the Italian National Annex, *Energy and Buildings*, 210, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109758>, 2020.

Ministrstvo za okolje in prostor, PURES-2: Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Retrieved December 18, 2024, from <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/88520.2008>.

Ministrstvo za okolje in prostor, PURES-3: Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Retrieved December 18, 2024, from <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=PRAVI4331>, 2022.

Palladino, D., Energy performance gap of the Italian residential building stock: Parametric energy simulations for theoretical deviation assessment from standard conditions, *Applied Energy*, 345, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121365>, 2023.

Perini, K., Chokhachian, A., Dong, S., Auer, T., Modeling and simulating urban outdoor comfort: Coupling ENVI-Met and TRNSYS by grasshopper, *Energy and Buildings*, 152, 373–384, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.061>, 2017.

Ramos-Carranza, A., Añón-Abajas, R. M., Rivero-Lamela, G., A research methodology for mitigating climate change in the restoration of buildings: Rehabilitation strategies and low-impact prefabrication in the “el rodezno” water mill, *Sustainability* (Switzerland), 13(16), <https://doi.org/10.3390/su13168869>, 2021.

Sayegh, H., Lilis, G., Bouquerel, M., Duforestel, T., Katsigarakis, K., & Rovas, D.: Automatic Modelica BEM generation from IFC BIM. 2024 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEnv), pp. 437–441. <https://doi.org/10.1109/MetroLivEnv60384.2024.10615614>, 2024.

Slovenija, Gradbeni zakon (GZ), (1. elektronska izdaja), Retrieved from <https://www.biblos.si/isbn/9789612046231>, 2024.

Ministrstvo za okolje in prostor, Tehnična smernica za graditev TSC-1-004: 2022 Energijska učinkovitost stavb 2. izdaja, Retrieved from <https://www.scribd.com/document/651870255/TSC-1-004-2022-Energetska-u%C4%8Dinkovitost-stavb>, 2022.

van Dijk, D.: EN ISO 52016-1: The New International Standard To Calculate Building Energy Needs for Heating And Cooling, Internal Temperatures And Heating And Cooling Load (pp. 4061–4068), <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211405>, 2019.

Wolf, S., Teitge, J., Mielke, J., Schütze, F., Jaeger, C., The European Green Deal — More Than Climate Neutrality, *Intereconomics*, 56(2), 99–107, <https://doi.org/10.1007/s10272-021-0963-z>, 2021.

Zainul Abidin, N.: Investigating the awareness and application of sustainable construction concept by Malaysian developers, *Habitat International*, 34(4), 421–426, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2009.11.011>, 2010.

Zavod za gradbeništvo Slovenije; Slovensko združenje za informacijsko modeliranje gradenj, BIM slovar: razlaga osnovnih pojmov na področju informacijskega modeliranja gradenj (1. izdaja), Retrieved from https://www.sibim.si/f/docs/dokumenti/BIM_Slovar_2023.pdf, 2023.