

Poročilo C1.1, Zvezek 5c:

Potenciali za zmanjšanje emisij do leta 2050 in
srednjeročni izzivi

Študija orientacij streh obstoječega stavbnega fonda v Sloveniji

Končno poročilo

LIFE ClimatePath2050 (LIFE16 GIC/SI/000043)

Poročilo *Študija orientacij streh obstoječega stavbnega fonda v Sloveniji* je del analize potencialov za zmanjšanje emisij TGP do leta 2050 v okviru projekta *LIFE Podnebna pot 2050, Slovenska podnebna pot do sredine stoletja* (LIFE ClimatePath2050 »*Slovenian Path Towards the Mid-Century Climate Target*,« *LIFE16 GIC/SI/000043*). Projekt izvaja konzorcij, ki ga vodi Institut »Jožef Stefan« (IJS), s partnerji: ELEK, načrtovanje, projektiranje in inženiring, d. o. o., Gradbeni Inštitut ZRMK (GI ZRMK), d. o. o., Inštitut za ekonomska raziskovanja (IER), Kmetijski inštitut Slovenije (KIS), PNZ svetovanje projektiranje, d. o. o., Gozdarski inštitut Slovenije (GIS) in zunanjimi izvajalci. Pričujočo študijo so izdelali zunanji izvajalci Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti (ZRC-SAZU)¹

ŠT. POROČILA/REPORT N.:

Poročilo C1.1, Zvezek 5c

DATUM/DATE:

November 2021

AVTORJI/AUTHORS:

izr. prof. dr. Žiga Kokalj
Žiga Maroh, univ. dipl. inž. geod. oba ZRC SAZU

SPREMLJEVALEC S STRANI IJS:

dr. Marko Kovač, IJS

REPORT TITLE/NASLOV POROČILA:

Deliverable C1.1: Climate Mitigation 2050 Potentials and Mid-term Challenges
Part 5c: Study of rooftop orientation of the existing building font in Slovenija

Končno poročilo C1.1: Potenciali za zmanjšanje emisij TGP in srednjeročni izzivi

Zvezek 5c: Študija orientacij streh obstoječega stavbnega fonda v Sloveniji – ekspertna ocena

© ZRC SAZU [2021]. Avtorske pravice za ta dokument so dodeljene ustanovi ZRC SAZU. Ta dokument se lahko reproducira samo v celoti ali delno ali pa se shrani v sistem za iskanje, ali v kakršni koli obliki ali na kakršen koli način elektronsko, mehansko, fotokopiranje ali kako drugače, s predhodnim dovoljenjem ZRC SAZU ali v skladu s pogoji naročila št. ZN21_09897.

Vsebina

| | |
|--|-----------|
| VSEBINA | 3 |
| POVZETEK | 4 |
| SUMMARY | 7 |
| 1. UVOD | 10 |
| 2. OPIS UPORABLJENIH PODATKOV | 10 |
| 2.1. KATASTER STAVB | 10 |
| 2.2. PODATKI AEROLASERSKEGA SKENIRANJA (ALS)..... | 10 |
| 3. PREDOBDELAVA PODATKOV | 11 |
| 3.1. OBDELAVA PODATKOV KATASTRA STAVB | 11 |
| 3.2. OBDELAVA PODATKOV AEROLASERSKEGA SKENIRANJA | 13 |
| 4. IZRAČUN SEGMENTOV, ZASUKA IN NAGIBOV | 15 |
| 5. ZAKLJUČEK | 22 |
| 6. SEZNAMI | 24 |
| 6.1. KRATICE IN OZNAKE | 24 |
| 6.2. SEZNAM SLIK | 24 |
| 1.1 SEZNAM PREGLEDNIC | 25 |

Povzetek

V okviru projekta LIFE Podnebna pot 2050² je bilo pripravljeno *Poročilo C1.1, Potenciali za zmanjšanje emisij do leta 2050 in srednjeročni izzivi*, v katerem so predstavljene glavne ugotovitve analize potencialov za zmanjšanje emisij TGP, pripravljene v okviru projekta v obdobju med 2017 in 2021. Rezultati analiz so bili s pomočjo modelov, razvitih ali nadgrajenih v projektu, uporabljeni za modeliranje ukrepov, scenarijev in njihovih učinkov³, kar je bilo ključna strokovna podlaga za *Dolgoročno podnebno strategijo Slovenije do leta 2050 (DPSS)*, *Nacionalnega energetskega podnebnega načrta Republike Slovenije (NEPN)*⁴; *Dolgoročne strategije energetske prenovе stavb do leta 2050*, *Operativnega programa nadzora nad onesnaževanjem zraka (OP NOZ)* in drugih strateških dokumentov.

Dokumentacijo analize potencialov oz. *Poročilo C1.1, Potenciali za zmanjšanje emisij do leta 2050 in srednjeročni izzivi* sestavlja več zvezkov:

- **Zvezek 0, Povzetek za odločanje**, kjer so izpostavljeni glavni rezultati analize potencialov;
- **Zvezek 1, Vloga novih tehnologij in goriv ter njihova perspektiva po sektorjih**, vključuje pregled tehnologij za katere se na podlagi inženirske ocene predvideva, da bi lahko v nekoliko daljši prihodnosti pomembno prispevale k zmanjšanju emisij toplogrednih plinov. Obravnavane so naslednje tehnologije: shranjevanje energije – toplotne in električne, vpliv shranjevanja energije na razvoj drugih tehnologij, gorivne celice, toplotne črpalke in odvečna toplota, vozila na električen in alternativne pogone (vodikove, plinske in druge), rešitve na področjih pametnih omrežij in snovne učinkovitosti ter prihodnje tehnologije v kmetijstvu;
- **Zvezek 2, Stavbe**, v katerem so celovito prikazani potenciali na področju zmanjševanja emisij TGP v sektorju stavb. Podan je pregled tehnologij in rešitev za zmanjšanje emisij TGP na ovoju stavbe, v sistemih v stavbah, prezračevanju, gospodinjskih aparatih in povzetek analize za razsvetljavo (celotna analiza je v Zvezku 7)⁵. Vključuje tudi dve posebni analizi: potencialov za zmanjšanje emisij TGP v stavbah kulturne dediščine in povzetek analize finančnih zmožnosti gospodinjstev za izvedbo ukrepov (celotna analiza je v Zvezku 2a). Predstavljena je tudi tipologija stavb, ki je osnova nadaljnjih analiz ter rezultati z oceno tehničnega in ekonomskega potenciala;
- **Zvezek 3, Promet**, v katerem je celovito prikazano potencialov na področju zmanjševanja emisij TGP v sektorju promet. Vključuje poglavja o ukrepih za zmanjšanje emisij TGP v prometu, dejavnikih, ki vplivajo na prometno delo, analizo novih tehnologij in storitev ter osnove za ocenjevanje vpliva na prometno delo, zmanjšanje emisij ter

² LIFE ClimatePath2050 (*Slovenian Path Towards the Mid-Century Climate Target*)

³ Poročilo C3.2. Povzetek analize scenarijev za odločanje o Dolgoročni podnebni strategiji Slovenije do leta, Poročilo projekta LIFE Podnebna pot 2050.

⁴ Obveznost pogodbenic za pripravo dolgoročne strategije razvoja, usmerjenega v družbo z nizkimi emisijami toplogrednih plinov, je opredeljena v 4. členu 19. odstavku *Pariškega sporazuma*.

⁵ Horizontalna analiza tehnologij za področje razsvetljave za več sektorjev je podana v *Poročilu C1.1, Zvezku 7*.

druge koristi in vplive, obširno poglavje o e-mobilnost ter o alternativnih gorivih v prometu;

- **Zvezek 4, Industrija**, ki vključuje celovit prikaz potencialov na področju zmanjševanja emisij TGP v sektorju industrija. Zvezek povzema pregled tehnologij po panogah, tehnologije na področjih izkoriščanja odvečne toplote in obnovljivih virov energije ter drugih horizontalnih tehnologij. Podani so rezultati ankete o porabi energije v industriji, ocena tehničnega potenciala za zmanjšanje emisij TGP v energetske intenzivnih dejavnostih in horizontalnih tehnologij ter izhodišča za analizo potenciala za zmanjšanje emisij z ukrepi na področju snovne učinkovitosti v industriji;
- **Zvezek 5, Transformacije**, ki vključuje celovit prikaz potencialov na področju zmanjševanja emisij TGP v sektorju transformacij. Zvezek obravnava tehnične in ekonomske potenciale za hidroelektrarne, sončne elektrarne, jedrske elektrarne tehnološki in gorivni prehod (*technology switch*), zajem in shranjevanje ogljika, soproizvodnjo toplote in električne energije, male hidroelektrarne, fleksibilne tehnologije (*smart flex technology*), vetrne elektrarne na kopnem, napredna (pametna) omrežja, geotermalne elektrarne in koncentratorske sončne elektrarne. Shranjevanje električne energije, je v celoti, vključno s potenciali za prodor zrelih tehnologij, obravnavano v Zvezku 1;
 - **Zvezek 5a, Analiza potenciala plitve geotermalne energije v Sloveniji do leta 2050**, ki vključuje ekonomske vidike izkoriščanja geotermalne energije, dejavnike in omejitve njenega izkoriščanja, pripravo koncepta in modela za izračun potenciala, izračun na primeru Maribora in analizo potenciala za gosto poseljena območja za celotno Slovenijo;
 - **Zvezek 5b, Potencial sončnih elektrarn na strehah objektov v Sloveniji do leta 2050**, celovit prikaz potencialov na področju zmanjševanja emisij TGP s pridobivanjem električne energije v Sloveniji iz strešnih elektrarn in samostojnih elektrarn na degradiranih območjih. Analiza vključuje podatke o osončenju, površinah, klimatskih pogojih, degradaciji tehnologije z leti, razvoj tehnologij, možnih izkoristkih površin, ovirah, glede omrežja in povpraševanja oz. možnosti shranjevanja energije, ekonomske parametre za ocen potenciala, ter oceno tehničnega in ekonomskega potenciala.
 - **Zvezek 5c, Študija orientacij streh obstoječega stavbnega fonda v Sloveniji**, ki pomeni nadgradnjo analize potenciala sončnih elektrarn z natančnejšo analizo orientacije streh v Sloveniji na podlagi katastra stavb in aerolaserskega skeniranja, izračune ter rezultate izračunanih segmentov po razredih nagibov in orientacije streh;
- **Zvezek 6, Ostali sektorji - LULUCF**, kjer je celovito prikazano stanje na področju zmanjševanja emisij TGP in povečevanja ponorov v sektorju rabe zemljišč, spremembe rabe zemljišč in gozdarstvo (LULUCF), kjer so podani ukrepi in tehnični potencial na gozdnih, kmetijskih in drugih zemljiščih. Podana so tudi izhodišča za; vrednotneje ekonomskega potenciala;
- **Zvezek 7, Analiza - razsvetljava v Sloveniji do leta 2050**, v kateri so predstavljene perspektive na področju razvoja tehnologij in njihove uporabe v gospodinjstvih, industriji

in stavbah storitvenega sektorja ter zunanje razsvetljave, vključno z novimi tehnologijami;

- **Zvezek 8, Analiza dejavnikov, povezanih s finančnimi sposobnostmi gospodinjstev, ki vplivajo na odločanje o investicijah za učinkovito rabo energije**, ki podaja in dokumentira analizo v celoti. Predstavljeni rezultati vključujejo: značilnosti gospodinjstev, ki so izvedla posamezne investicije za učinkovito rabo energije, ki so uporabila spodbude Eko sklada, glede njihove opremljenosti in glede na sposobnosti za financiranje potrebnega obsega investicij;
- **Part 9. Financiranje prehoda v nizkoogljično družbo v Sloveniji – ključni izzivi in strateške usmeritve**, naslavlja naslednje vsebine in izzive: trenutno strukturo javnega financiranja, ki je pomembna za podnebje, naložbe v nizkoogljične možnosti, institucionalna ureditev, povezana z upravljanjem javnih podnebnih financ, ureditev finančnega sektorja, vprašanja distribucije in sprejemljivosti;
- **Zvezek 10: Metodologija**, v katerem so podana izbrana poglavja o metodologijah za ocene potencialov: okvir za oceno tehničnega in ekonomskega potenciala za izkoriščanje plitve geotermalne energije, ocena potenciala sončne energije, analiza dejavnikov povezanih s finančnimi sposobnostmi gospodinjstev za izvedbo ukrepov URE in OVE ter ocena potenciala za izkoriščanje odvečne toplote v industriji. V tem poročilu so izpostavljene izbrane metodologije, opisi ostalih uporabljenih metodologij so podani v posameznem zvezku;
- **Dodatek 1: Povzetek rezultatov in gradiva tehničnih delavnic**, obsega Poročilo o delavnici, program delavnice in predstavitev z delavnic: *Izkoriščanje trde biomase v energetske namene in potenciali do leta 2050, poroči in Prihodnost zemeljskega plina in razvoj niskoogljičnih nadomestnih goriv* obsega. Za gradiva z ostalih delavnic na področjih analize potencialov glej spletno stran projekta (*Poročilo 5.3. Gradiva objavljena na spletni strani projekta - sinteza delavnic analize scenarijev*).

Summary

The *Deliverable C1.1, A composite report: Climate Mitigation 2050 Potentials and Mid-term Challenges* presents the main findings of the analysis GHG emissions reduction potential prepared in the frame of the project LIFE ClimatePath2050⁶ in the period between 2017 and 2021. The results of the analyses of potentials were used in the models, developed or upgraded in the project for the assessment of several scenarios of measures as regards GHG emission reduction, air emission reduction, socio-economic impacts and impacts on sectorial development targets. The analyses were key expert basis for *Slovenian climate long-term strategy 2050 (LTS)*, final version of the *Integrated national energy and climate plan of the Republic of Slovenia (NECP)*, *National air pollution control programme* and *Long-term energy renovation strategy for 2050 (DSEPS 2050)* and other strategic documents.

The *Deliverable C1.1, A composite report: Climate Mitigation 2050 Potentials and Mid-term Challenges* consists of the following parts:

- **Part 0, Summary for decision-makers**, highlights the key results of the analysis of potentials;
- **Part 1, Role of new technologies and fuels and their perspectives by sector**, includes an overview of the GHG reduction potential of the following new technologies and fuels: electrical and thermal storage (short- and long-term), the impact of storage system on the deployment of the other technologies, fuel cells, waste heat and heat pumps, alternative fuels and electric mobility for transport of passengers and goods, smart grids, new technologies in agriculture and also potential for energy efficiency through material efficiency was presented;
- **Part 2, Deep renovation of buildings**, in this part, a comprehensive presentation of potentials for GHG reduction in building sector is given, including an overview of technologies and solutions on building envelope, heating and cooling systems in the buildings, household appliances and lighting (a summary⁷). Two specific analyses are included: analysis of GHG reduction potential at cultural heritage buildings and a summary of the analysis on financial capabilities of households to implement renewable energy (RES) and energy efficiency (EE) measures⁸. In this part, also includes a new typology of buildings, being a basis of the further analyses, and presents the final the results of the assessment of technical and economic potential for GHG emissions reduction in buildings.

⁶ LIFE ClimatePath2050 (*Slovenian Path Towards the Mid-Century Climate Target*)

⁷ In *Part 2*, summary on lighting in buildings is included, the entire analysis on prospect of lighting until 2050, is presented in *Deliverable C1.1, Part 7*, was carried out by external assistance of Fakulteta za elektrotehniko/Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana.

⁸ *Deliverable C1.1, Part 2a, Analysis of factors related to the financial capacity of households influencing energy efficiency investment decisions*, includes the entire analysis, carried out by external assistance of Center poslovne odličnosti Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani, CPOEF, Centre of Business Excellence of the School of Economics and Business, University of Ljubljana,.

- **Part 3, Transport**, includes overview of potentials for GHG reduction in the transport sector. Includes chapters on GHG reduction measures in transport, factors influencing transport load, analysis of new technologies and services and basis for estimation of the impacts on transport load, emission reduction, other benefits and impacts, e-mobility and alternative fuels in transport;
- **Part 4, Industry**, includes overview of potentials for GHG reduction in the industrial sector. The overview of technologies includes technologies used in energy intensive branches by branch, waste heat use and horizontal technologies including energy efficient electric motors, compressed air, lighting, renewable energy technologies and cogeneration. The report presents also results of the pool among industrial companies and is concluded by the results of the assessment of technical potential for GHG emissions reduction in energy intensive industrial branches and by horizontal technologies;
- **Part 5, Transformation**, includes results of the analysis of GHG emission reduction potentials in the transformation sector. The analysis comprise overview of technical and economic potentials for hydroelectric power plants, solar power plants (summary), nuclear power plants, technology and fuel switching, carbon capture and storage, cogeneration of heat and electricity, small hydropower plants, smart flex technology, onshore wind farms, advanced (smart) networks, geothermal power plants and concentrator solar power plants. The energy storage is entirety, including the potential for penetration of mature technologies, discussed in Part 1 on new technologies;
 - **Part 5a, The analysis of shallow geothermal energy potential in Slovenia until 2050**, consists of overviews of economic aspects of geothermal energy exploitation, the other factors and limitations, preparation of concept and model for potential calculation, results for the case study Maribor and results of the analysis of potential for densely populated areas Slovenia;
 - **Part 5b, The analysis of the Photovoltaic Rooftop Potential in Slovenia by 2050**, provides a comprehensive presentation of potentials for reducing GHG emissions in Slovenia by electricity from rooftop PV systems and stand-alone systems in degraded areas Analysis includes data on insolation, surfaces, climatic conditions, technology degradation over the years, technology development, possible surface utilization, barriers, electricity grid, demand, energy storage options, economic parameters for potential assessments, and the results of the assessment of technical and economic potential;
 - **Part 5c, Study of roof orientations of the existing building stock in Slovenia**, presents results of an upgrade of the analysis photovoltaic rooftop potential, including a more detailed analysis of roofs orientation. The analysis includes data on cadastre and airborne laser scanning, calculations and results of the calculated segments by classes of slopes and roof orientation;
- **Part 6, Other Sectors - LULUCF**, which presents the situation in the field of reducing GHG emissions and increasing sinks in the sector of land use, land use change and forestry (LULUCF), and gives overview of measures and analysis technical potential in forest, land and other land categories.

- **Part 7, Analysis lighting in Slovenia until 2050**, which presents perspectives in the field of lighting technology development and their use in households, industry and buildings of the service sector and outdoor lighting, including new technologies.
- **Part 8, The Analysis of financial capacity factors influencing investment choices of end users**, includes analyses of characteristics of households that have made individual investments for energy efficiency, which have used the incentives of the Eco fund, characteristics of households and their equipment, and in terms of ability to finance the required volume of investments;
- **Part 9, Financing transition to low-carbon society in Slovenia - Key challenges and guidance towards policy strategies**, is addressing the following topics and challenges: current structure of public financing with climate relevance, investments in low-carbon options, institutional set up related to the governance of public climate finances, financial sector's set-up and distributional issues and acceptance;
- **Part 10, Methodology**, which provides selected chapters on methodologies for potential assessments: framework for assessing technical and economic potential for shallow geothermal energy, assessment of solar energy potential, analysis of factors related to household financial capacity to implement EEU and RES measures and assessment of the potential for exploitation of excess heat in industry. Selected methodologies are highlighted in this report, while the other methodologies are described in parts 1-7 of this composite report;
- **Supplement 1: Summary of results and materials of technical workshops** includes summaries of the outcomes, agendas and presentations of workshops: *Exploitation of solid biomass for energy purposes and potentials until 2050, reports and The future of natural gas and development of carbon-free alternative fuels includes*. Material of the other workshops on the analysis of potentials, see the project website (and *Deliverable C5.3, Documentation published on the project web page: A Synthesis of Outcomes and Documentation of Workshops on Scenario Analysis*).

1. Uvod

Namen tega poročila je opisati uporabljene podatke, njihovo obdelavo in metodo izračuna orientacije (zasuka in nagiba) streh obstoječega stavbnega fonda v Sloveniji. Naloga je del izboljšave osnov za oceno potenciala sončnih elektrarn na strehah obstoječih streh stavb v Sloveniji. Potencial sončnih elektrarn omogoča lažje načrtovanje prehoda v nizkoogljično družbo v okviru projekta LIFE Podnebna pot 2050 in je pomemben za nadaljnje analize scenarijev prehoda v nizkoogljično družbo, torej za izvedbo After-LIFE aktivnosti.

Orientacija streh je ključen parameter, ki ga ni mogoče pridobiti neposredno iz obstoječih registrov stavb v Republiki Sloveniji. Primeren vir za takšne podatke so ustrezno obdelani podatki aerolaserskega skeniranja Slovenije (ALS). Podatki o konkretni orientaciji streh objektov lahko v nadaljevanju služijo za boljši izračun izplena sončnih elektrarn na strehah teh objektov.

2. Opis uporabljenih podatkov

2.1. Kataster stavb

Kataster stavb je temeljna evidenca podatkov o stavbah. Sestavljen je iz zadnjih vpisanih podatkov o stavbah in delih stavb ter iz zbirke listin in podatkov, ki omogočajo historični pregled sprememb. Stavba je objekt, v katerega lahko človek vstopi, in ki je namenjen njegovemu stalnemu ali začasnemu prebivanju, opravljanju poslovne ali druge dejavnosti ali zaščiti ter ga ni mogoče prestaviti brez škode za njegovo substanco. Lahko ima en del ali več delov. V kataster stavb se za stavbo ali del stavbe vpisujejo naslednji podatki: identifikacijska oznaka; lastnik; upravljavalec; lega in oblika; površina; dejanska raba; številka stanovanja ali poslovnega prostora. Podatki katastra stavb se vodijo in vzdržujejo v centralni bazi. Centralna baza podatkov o stavbah se povezuje z drugimi evidencami, ki jih vodi geodetska uprava (zemljiški kataster, register prostorskih enot, register nepremičnin). Podatki katastra stavb so osnova za vpis stavbe ali dela stavbe v zemljiško knjigo (Geodetska uprava Republike Slovenije, 2021).

Viri ob vzpostavitvi katastra stavb so bili fotogrametrični zajem, terenski zajem, prevzem iz drugih evidenc in na podlagi tega je odvisna tudi položajna natančnost koordinat, ki variira od 0–12 cm za terenske meritve do nad 150 cm za terenske meritve brez navezave na mrežo. Kataster stavb se vzpostavlja v skladu z Zakonom o evidentiranju nepremičnin. Zbirka podatkov se vodi v državnem ETRS koordinatnem sistemu D96/TM (Geodetska uprava Republike Slovenije, 2021). Uporabili smo grafične podatke o obrisih stavb iz leta 2021 in podatke o centroidih stavb iz leta 2015.

2.2. Podatki aerolaserskega skeniranja (ALS)

Kot referenčni sloj za izračun zasuka in naklonov streh smo uporabili državne podatke aerolaserskega skeniranja Slovenije (Ministrstvo za okolje in prostor RS). Posebna prednost

laserskih podatkov je razslojevanje na informacije glede na vrsto odboja, saj lahko tako ločimo stanje na površju (model površja) ter stanje na tleh (model reliefa). Z gostoto skeniranja 5 točk/m² so bili podatki večinoma zajeti v letih 2014 in 2015, praviloma spomladi in jeseni, ko drevje ni olistano, v visokogorju pa z gostoto 2 točki/m² in v izogib snežiščem tudi poleti. Podatki so brezplačni, prosto dostopni in pokrivajo ozemlje cele države. Georeferenciran in klasificiran oblak točk (GKOT) hrani točke, razvrščene v šest razredov: tla, nizka (do višine 1 m), srednja (med 1 m in 3 m) in visoka vegetacija (nad višino 3 m), stavbe ter neklasificirane točke.

3. Predobdelava podatkov

3.1. Obdelava podatkov katastra stavb

Pri analizi smo želeli uporabiti podatke, ki so bili zajeti čim bolj sočasno. Grafični del (obrise in centroide) katastra stavb iz leta 2015 smo imeli na voljo samo v (stari) projekciji D48. Ker pri preprojekciji celotne baze podatkov v novi koordinatni sistem (D96) z enotnimi parametri za celo državo pride do lokacijske napake tudi do 1 m, smo pri analizi upoštevali obrise katastra iz leta 2021, ki je v projekciji D96 in ohranili samo tiste stavbe, katerih centriodi iz leta 2015 padejo v obrise iz 2021. Obrisi iz 2021 so tudi bolj natančni, čeprav se ponekod prekrivajo. Po izbrisu stavb manjših od 20 m² (73.700) ostane za analizo 1.063.500 poligonov.

Pri analizi delovanja algoritma za segmentacijo ter izračun zasuka in nagiba segmentov smo se osredotočili na središče Kamnika (2 km²), ki vključuje stavbe z raznolikimi oblikami in velikostmi streh. Posebno pozornost smo namenili devetim vzorčnim stavbam (preglednica 1 in slika 2).



Slika 1: Del Kamnika s prikazanim katastrom stavb iz leta 2021. Prikazane so stavbe, katerih centriodi iz leta 2015 sovpadajo z obrisi iz leta 2021.

Preglednica 1: Vzorčne stavbe.

| slika | SID | |
|----------|----------|--|
| slika 2a | 22355925 | stanovanjska stavba s členjeno streho in nadstreški |
| slika 2b | 22452139 | stanovanjska stavba z večkapno streho in prizidkom z dvokapno streg, oboje z nadstreški |
| slika 2c | 27629462 | proizvodne hale s tipično »harmonikasto streho« |
| slika 2d | 22355857 | stanovanjska stavba s preprosto dvokapno streho, obris je zamaknjen glede na podatke ALS |
| slika 2e | 22356591 | členjena stanovanjska stavba s prizidkom |
| slika 2f | 22356606 | členjena šolska stavba s telovadnico z veliko ravno streho |
| slika 2g | 27628614 | majhna stavba s preprosto dvokapno streho, obris je zelo zamaknjen glede na podatke ALS |
| slika 2h | 31503208 | stavba z dvokapno streho in prizidkom z dvokapno streho, oboje z nadstreški in dimniki |
| slika 2i | 30474027 | kompleks stanovanjskih blokov z zelo členjeno streho in vključeno podzemno garažo |



Slika 2: Vzorčne stavbe.

3.2. Obdelava podatkov aerolaserskega skeniranja

Za izračun posameznih segmentov streh potrebujemo raster s prostorsko ločljivostjo 0,5 m na katerem je odstranjeno vse rastje, ohranjene pa so stavbe. Pri tem je izjemno pomemben način rastriranja, saj smo tovrstne rastrske podatke že imeli, vendar so bili za namen naloge manj primerni (slika 3). Novo izračunani podatki imajo bistveno manj artefaktov, ki so posledica lastnosti laserskega skeniranja. Strehe so bolj »gladke«, kar poenostavlja izračun posameznih ploskev (segmentov streh) (slika 4). Hkrati je izračun orientacije pravilnejši.

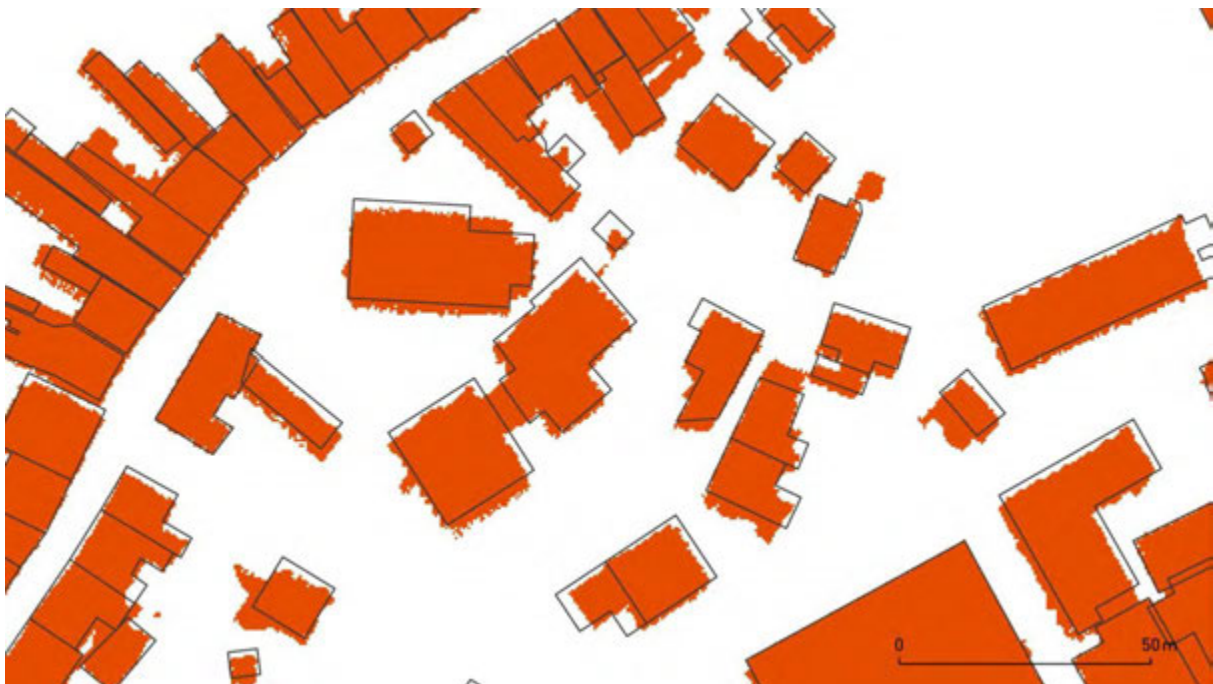
Zaradi zamika katastra stavb glede na dejansko stanje (ALS) je treba iz območij površine stavbe odstraniti piksele tal, torej piksele z relativno višino nižjo od 2 m. Relativne višine smo računali z normalizacijo georeferenciranih in klasificiranih oblakov točk (GKOT) pri čemer smo upoštevali samo točke terena in stavb (kategoriji 2 in 6). Kljub upoštevanju 25 m okolice posameznih izsekov izračuna ($1 \times 1 \text{ km}^2$) so zaradi načina rastriranja kot teren zaznane zelo velike stavbe in velike stavbe na robovih rastra. Zato podatke o višinah teh stavbah dodamo z masko poligonov velikih stavb ($>1000 \text{ m}^2$). Vhodni podatek za izračun segmentov je tako raster, kjer so podatki o nadmorski višini za vse celice, ki imajo v oblaku točk aerolaserskega skeniranja kategorijo 6 (stavba) in dodatno vse celice, ki pripadajo poligonom velikih stavb (slika 5). Algoritem za izračun segmentov v prvi fazi uporabi filter mediane, saj s tem nekoliko poenostavi podatke (slika 6) in še izboljša rezultate.



Slika 3: Rastrski podatki aerolaserskega skeniranja, ki prikazujejo tla in stavbe. Način rastriranja, ki lepo ohranja majhne topografske značilnosti, npr. arheološke ostaline, je za izračun nagibov in zasukov delov streh manj primeren, ker so zelo vidni artefakti (npr. črte), ki so posledica lastnosti laserskega skeniranja.



Slika 4: Ponovno izračunani rastrski podatki aerolaserskega skeniranja, ki prikazujejo tla in stavbe.



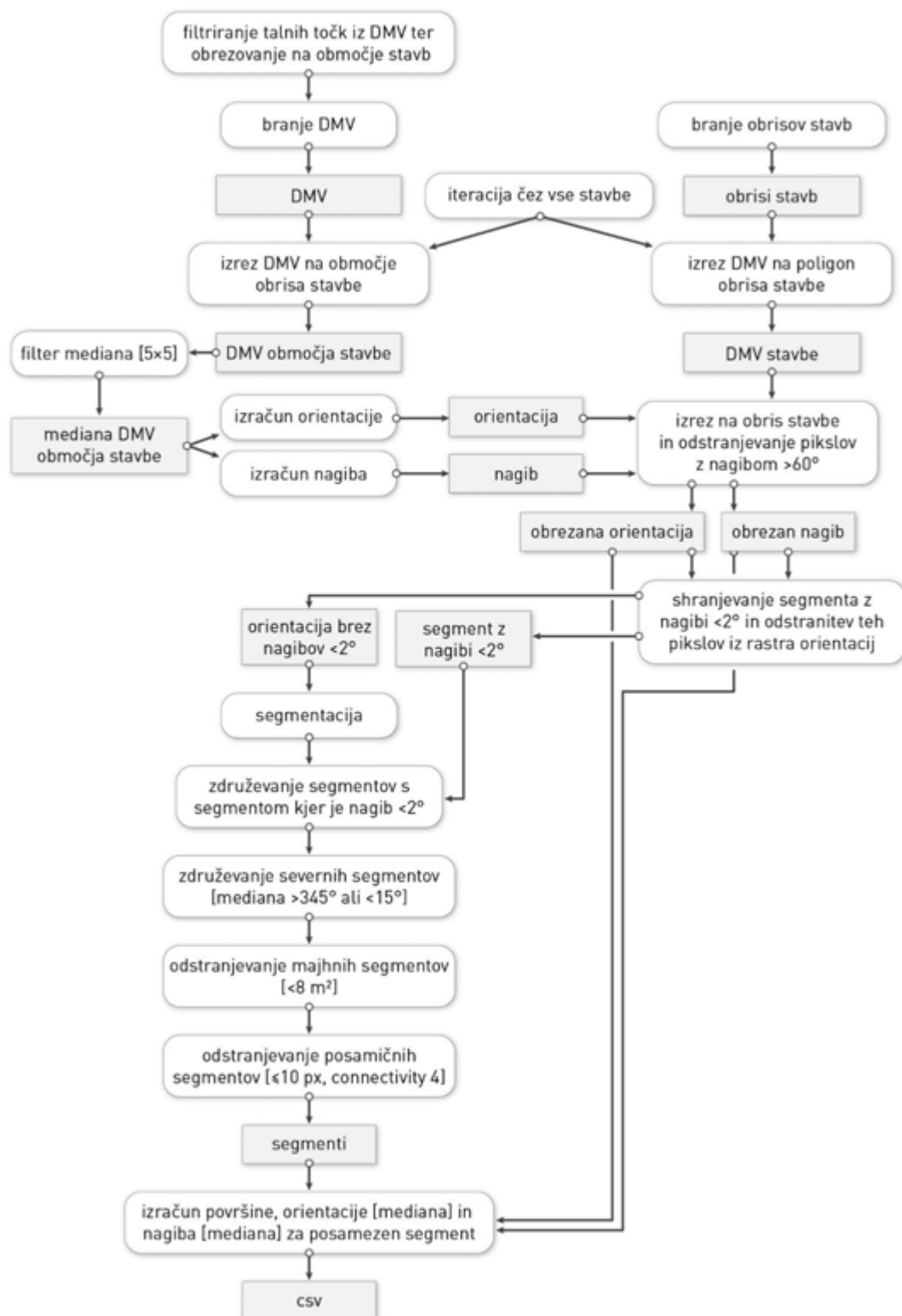
Slika 5: Podatki kjer so z oranžno označene celice, ki pripadajo stavbam, torej celice, ki so v podatkih aerolaserskega skeniranja označene kot stavbe (kategorija 6) in imajo hkrati višino od tal višjo od 2 m.



Slika 6: Podatki kjer so z oranžno označene celice, ki pripadajo stavbam, po filtriranju s filtrom mediana. Opaziti je neskladje med katastrom stavb in podatki aerolaserskega skeniranja.

4. Izračun segmentov, zasuka in nagibov

Za izračun segmentov, zasuka in nagibov smo uporabili programski jezik Python s knjižnicami *rasterio*, *numpy*, *geopandas* in *arcpy*. Za paralelizacijo izračunov smo uporabili modul *multiprocessing*, za beleženje časov izračunov pa knjižnico *tqdm*.

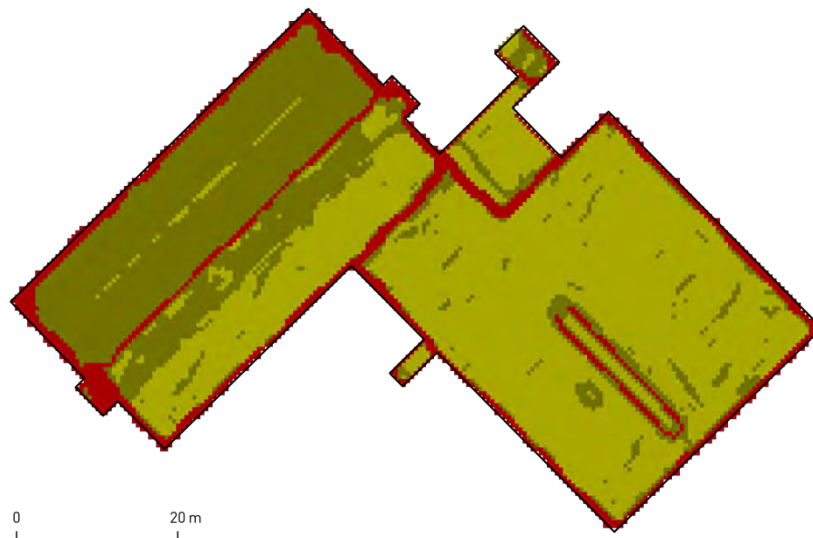


Slika 7: Potek izračuna velikosti, zasuka in nagiba segmentov streh.

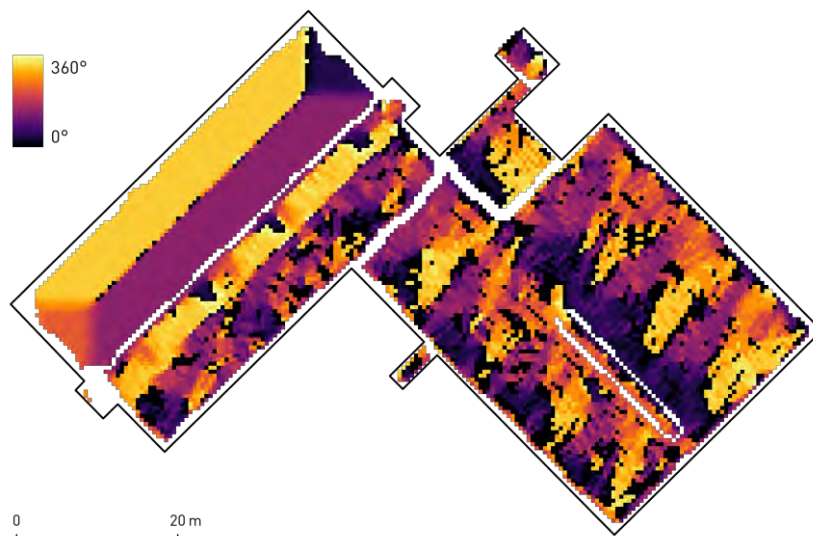
Potek izračuna prikazuje slika 7. Z vektorskimi obrisi stavb smo izrezali model višin, enkrat na dejanski obris stavbe in drugič na širše območje (*bounding box*) obsega. Pri slednjem smo uporabili filter mediana velikosti 5×5 pikslov in izračunali zasuk in nagib. Za nadaljnji izračun

smo uporabili samo piksele, ki ležijo znotraj obroisa stavbe in imajo nagib manjši od 60° (slika 8). Posamezne ploskve streh (segmente) smo računali na rastru zasuka (slika 9) iz katerega smo kot poseben segment izločili vse piksele z nagibom manjšim od 2° . Na »horizontalnih« ploskvah je namreč zaradi lastnosti podatkov zasuk zelo variabilen in tovrstne ploskve so posledično razbite na veliko število segmentov (slika 10).

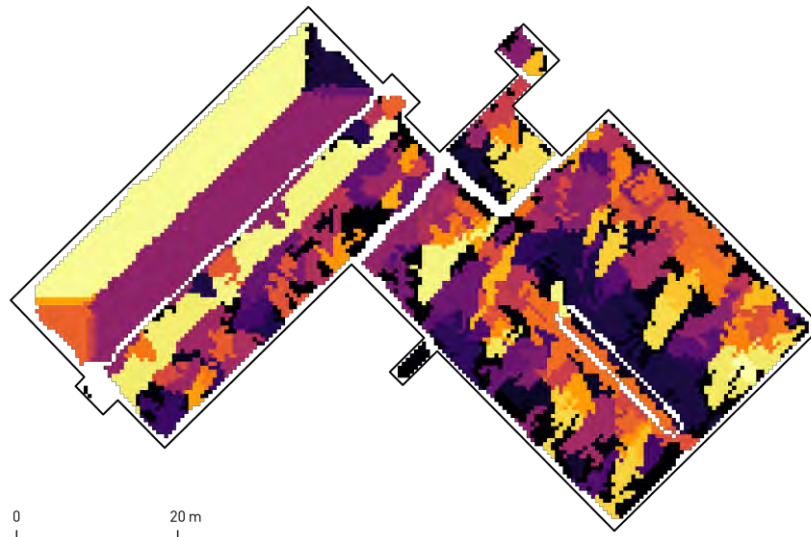
Pri segmentaciji zasuka je problem zaradi kroga, ker na severu skupaj pridejo vrednosti 360° in 0° . Tega se ne da združiti, saj pri vseh variantah normalizacije naletimo na težave, npr. da dobimo enake vrednosti za S in J ali V in Z ... K sreči nas severne lege pri izkoriščanju sončne energije ne zanimajo, zato smo kot rešitev združili vse segmente z mediano zasuka v razponu 15° od severa, torej med 345° in 15° .



Slika 8: Nagibi na strehi Osnovne Šole Toma Brejca v Kamniku. Piksele z nagibom večjim od 60° (rdeče) smo izločili iz nadaljnje obravnave, piksele z nagibom manjšim ali enakim 2° (svetlo zeleno) pa smo upoštevali kot svoj segment.

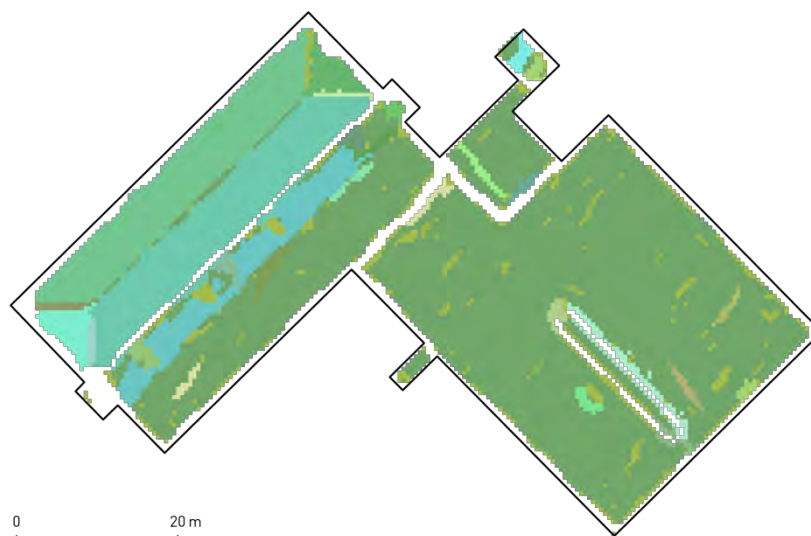


Slika 9: Zasuk na strehi Osnovne Šole Toma Brejca v Kamniku. Na ravnih strešnih ploskvah je opaziti zelo veliko variabilnost zasuka in posledično segmentov (slika 10).



Slika 10: Segmenti brez posebnega obravnavanja horizontalnih leg. Na ravnih strešnih ploskvah je opaziti zelo veliko število segmentov.

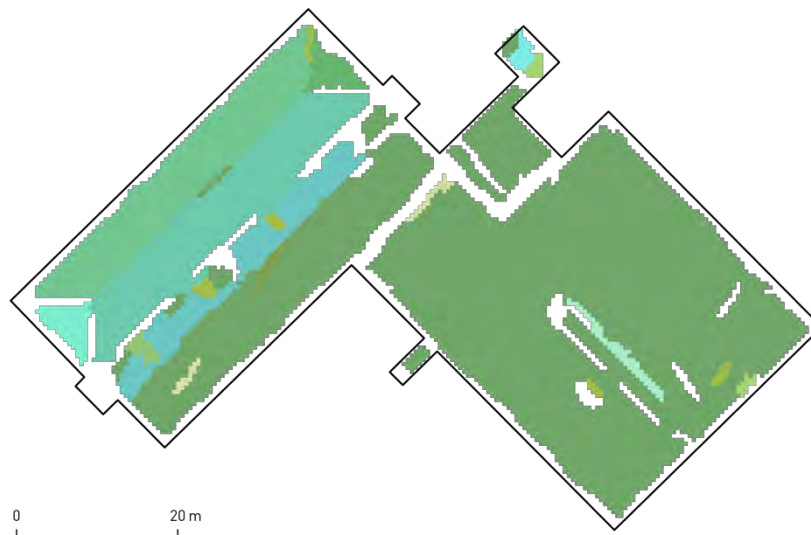
Po končani segmentaciji (slika 11) smo rezultat filtrirali s filtrom *sieve*, ki združuje manjše skupine pikslov s sosednjimi (slika 12). Pri tem smo upoštevali najmanjšo velikost skupine 10 pikslov, pri čemer se ne štejejo vogalni sosedje piksla (metoda štirih sosedov). S tem pristopom smo v primeru Osnovne šole Toma Brejca prvotno število 62 segmentov zmanjšali na 28 segmentov, po upoštevanju najmanjše velikosti segmenta 8 m^2 , pa na končnih 13 segmentov (slika 13). Ker je zaradi vseh pogojev izračuna velikost strehe vedno manjša od dejanske (glede na obris v katastru stavb), smo za najmanjšo velikost segmenta izbrali nekoliko manjšo vrednost, kot je predvideno v projektni nalogi. Segmentov manjših od 10 m^2 je 5,6%.



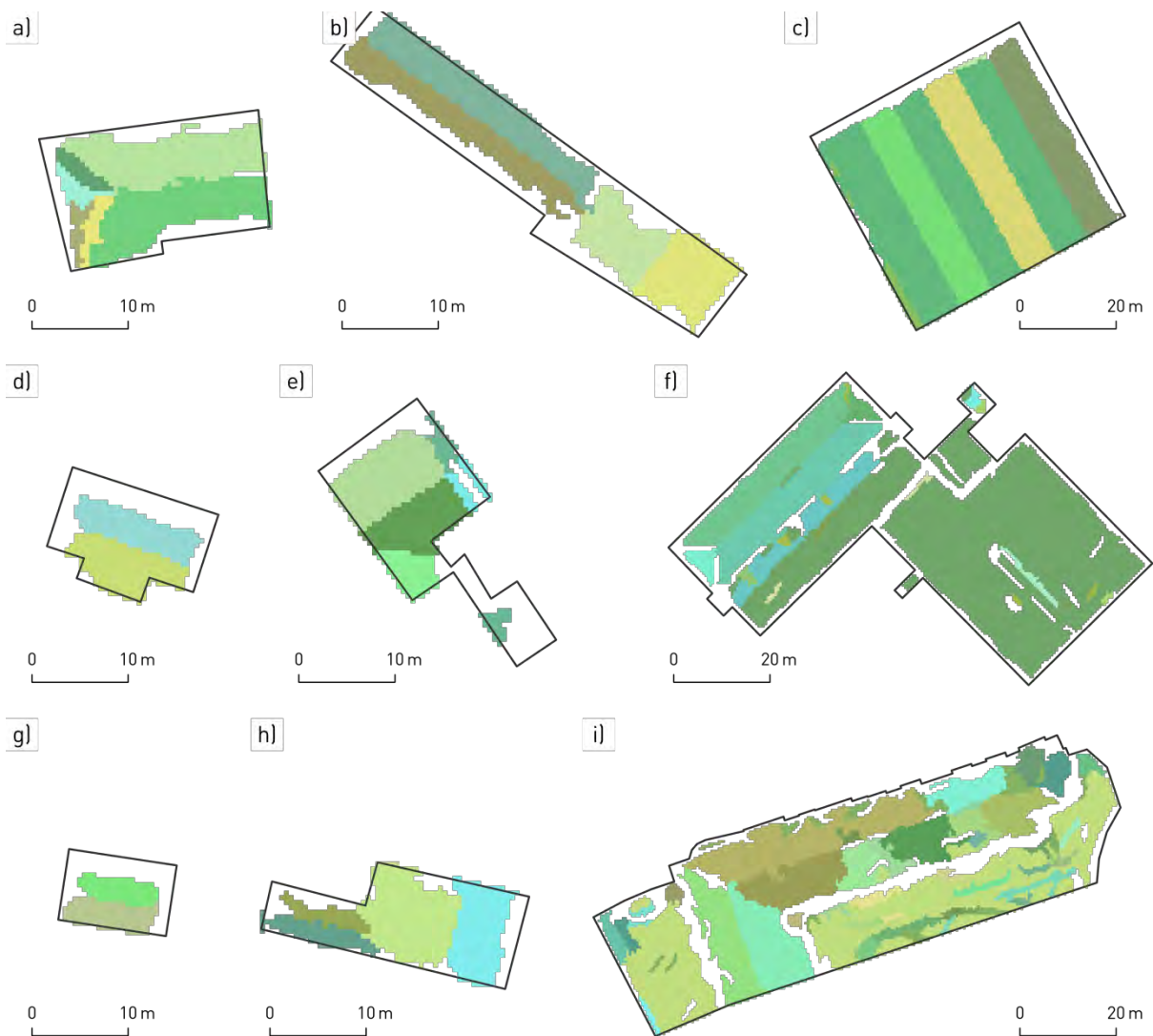
Slika 11: Segmenti po upoštevanju horizontalnih ploskev kot svoj segment in po združevanju severnih leg.



Slika 12: Segmenti po izločevanju manjših skupin pikselov.



Slika 13: Končni segmenti po upoštevanju njihove najmanjše velikosti.



Slika 14: Izračunani segmenti na vzorčnih stavbah.

8,1% stavb (92.561) nima izračunanih segmentov s pripisanimi atributi. Od tega jih je 70,3% manjših od 50 m². Pri veliki večini je problem v tem, da v oblaku točk aerolaserskega skeniranja niso označene kot stavbe in zato na terenu niso razpoznavne (primer prikazuje slika 15). Pri stavbah manjše površine je lahko vzrok tudi v tem, da z algoritmom odstranjevanja velikih naklonov ne ostane dovolj velika površina (npr. pri zvonikih) ali pa so po končanem izračunu vsi segmenti premajhni (nobeden ni večji od 8 m²).



Slika 15: Primer stavbe za katero izračun ni bil uspešen (rdeč pravokotnik), saj v oblaku točk aerolaserskega skeniranja ni označena kot stavba (ni rdečih točk) in zato na rastru stavb ni razvidna. Na sliki je opaziti tudi primer, ko je stavba v oblaku točk označena (desno spodaj), a ni vpisana v kataster stavb. V zelenih tonih so označeni odboji z vegetacije, v rjavih pa odboji s tal.

Rezultati so zapisani v tekstovni datoteki z atributi *SID* (identifikator stavbe, ki služi kot povezava z grafičnim delom katastra stavb), *segment_ID* (ID posameznega segmenta za določen SID), *segment_area* (površina segmenta), *segment_slope* (mediana nagiba segmenta), *segment_aspect* (mediana zasuka segmenta). Posamezni atributi so ločeni s podpičjem (»;«), posamezni segmenti pa s presledkom (» «). Decimalno ločilo je pika (».«) (preglednica 2).

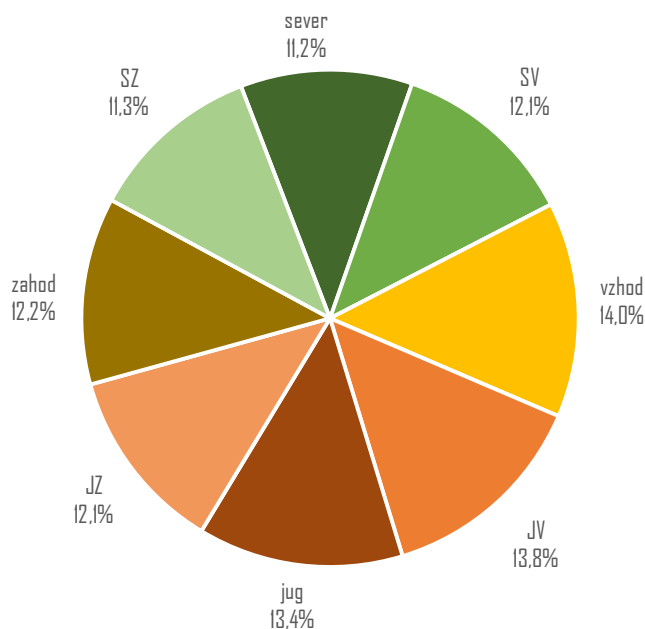
Preglednica 2: Zapis izračunanih segmentov in njihovih atributov v končni tekstovni datoteki.

| SID;segment_ID;segment_area; segment_slope;segment_aspect |
|---|
| 31591492;1 2;38.4 29.5;17.7 16.5;142.4 341.6 |
| 31591543;1;21.6;31.5;267.1 |
| 31591563;1;8.5;4.7;341.6 |
| 31591565;1 2 3;120.8 101.0 17.4;35.2 35.9 35.5;73.6 255.1 304.2 |
| 31591606;1 2 3 4;13.9 95.2 62.2 16.0;28.4 37.7 36.6 46.4;33.7 150.3 330.5 312.2 |
| 31591804;1;120.7;9.7;98.1 |
| 31591806;1 2 3 4;22.7 51.4 11.6 10.6;18.8 9.7 10.2 27.3;41.2 96.3 93.4 269.6 |
| 31591810;1 2 3 4 5;34.8 80.1 30.5 14.4 38.3;37.7 41.5 37.9 36.3 41.7;57.0 148.3 236.5 295.0 329.4 |
| 31591817;;;; |
| 31591819;1 2 3;51.4 9.8 63.5;28.8 35.6 31.7;192.6 263.0 14.3 |

| SID;segment_ID;segment_area; segment_slope;segment_aspect |
|--|
| 31591821;1 2 3 4;107.0 79.1 16.3 12.4;39.7 40.1 40.5 46.7;52.9 233.0 245.0 277.5 |
| 31591824;1 2 3 4;15.1 12.2 23.8 30.3;15.2 26.1 1.1 16.7;189.5 318.0 45.0 9.5 |
| 31591830;;;; |
| 31591833;1 2;58.6 52.1;41.0 42.4;82.2 264.2 |
| 31591845;1 2;37.9 24.8;37.6 36.9;126.7 309.2 |

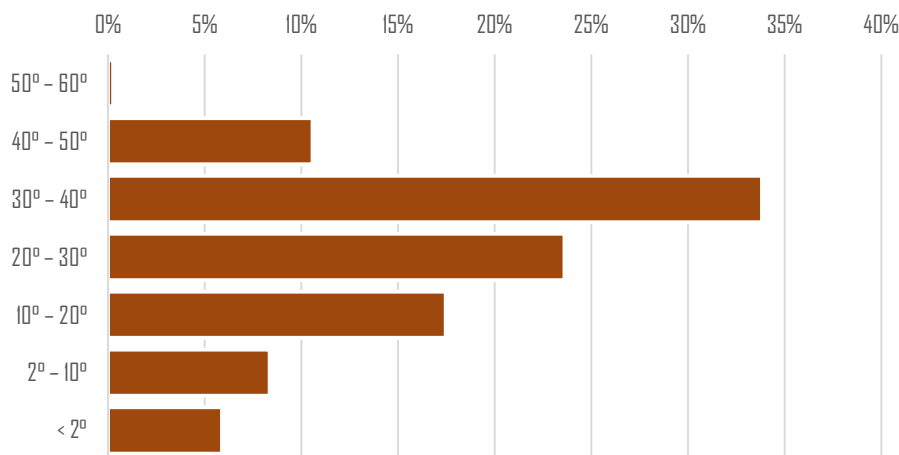
5. Zaključek

Skupna površina izračunanih segmentov je 145.3 km². Glede na zasuk so površine razporejene razmeroma enakomerno, čeprav je vseh južnih leg (39,3%) nekoliko več kot severnih (34,5%) (Slika 16).



Slika 16: Deleži površin segmentov glede na zasuk.

Prevladujejo nakloni med 20° in 40°, kar je za zajem sončne energije ugodno (slika 17). Podrobnejšo razporeditev glede na naklonske razrede in zasuk podaja **Error! Reference source not found.**



Slika 17: Deleži površin segmentov glede na naklon.

Preglednica 3: Površine segmentov [1000 m²] po razredih nagibov in zasuka. Najprimernejši razred za izkoriščanje sončne energije je pri zasuku na jug (zasuk $180^{\circ} \pm 15^{\circ}$) in pri naklonskem razredu $31^{\circ} - 33^{\circ}$.

| | >jug+60° | jug+60° | jug+30° | jug | jug-30° | jug-60° | >jug-60° |
|---------|----------|---------|---------|--------|---------|---------|----------|
| >38° | 7.553 | 2.008 | 2.161 | 2.204 | 2.021 | 2.112 | 7.786 |
| 33°-38° | 7.075 | 2.007 | 2.206 | 2.166 | 1.913 | 2.162 | 7.728 |
| 31°-33° | 2.566 | 750 | 829 | 795 | 724 | 803 | 2.780 |
| 26°-31° | 5.467 | 1.553 | 1.748 | 1.772 | 1.502 | 1.696 | 5.908 |
| <26° | 15.280 | 4.101 | 5.761 | 6.596 | 5.110 | 7.968 | 20.441 |
| skupaj | 37.941 | 10.419 | 12.705 | 13.533 | 11.270 | 14.741 | 44.643 |

Z oddajo tega poročila in podatkov (obrisi stavb, ki so bili vključeni v izračun in tekstovna datoteka z izračuni (orientacije_izracuni.csv)) zaključujemo z deli vezanimi na naročilo ter ugotavljamo, da smo uspešno izvedli vse obveznosti.

Priloženi podatkovni datoteki:

- kataster_stavb_obrisi_2015.zip (95,37 MB)
- orientacije_izracuni.zip (20,97 MB)

6. Sezname

6.1. Kratice in oznake

| | |
|------------------|--|
| <i>ALS</i> | aerolaserskega skeniranje |
| <i>arcpy</i> | knjižnica programskega jezika Python |
| <i>D48</i> | državni koordinatni sistem D48/GK |
| <i>D96</i> | državni koordinatni sistem D96/TM (Geodetska uprava Republike Slovenije, 2021) |
| <i>dmv</i> | digitalni model višin |
| <i>ETRS</i> | European Terrestrial Reference System |
| <i>geopandas</i> | knjižnica programskega jezika Python |
| <i>GKOT</i> | Georeferenciran in klasificiran oblak točk |
| <i>IJS</i> | Institut "Jožef Stefan", vodilni partner projekta LIFE Podnebna pot 2050 |
| <i>MB</i> | megabajt |
| <i>numpy</i> | programski paket programskega jezika Python |
| <i>rasterio</i> | knjižnica programskega jezika Python |
| <i>SID</i> | identifikator stavbe |
| <i>TGP</i> | toplogredni plini |
| <i>tqdm</i> | knjižnica programskega jezika Python |

6.2. Seznam slik

| | |
|--|----|
| Slika 1: Del Kamnika s prikazanim katastrom stavb iz leta 2021. Prikazane so stavbe, katerih centriodi iz leta 2015 sovpadajo z obrisi iz leta 2021. | 11 |
| Slika 2: Vzorčne stavbe. | 12 |
| Slika 3: Rastrski podatki aerolaserskega skeniranja, ki prikazujejo tla in stavbe. Način rastriranja, ki lepo ohranja majhne topografske značilnosti, npr. arheološke ostaline, je za izračun nagibov in zasukov delov streh manj primeren, ker so zelo vidni artefakti (npr. črte), ki so posledica lastnosti laserskega skeniranja. | 13 |
| Slika 4: Ponovno izračunani rastrski podatki aerolaserskega skeniranja, ki prikazujejo tla in stavbe. | 14 |
| Slika 5: Podatki kjer so z oranžno označene celice, ki pripadajo stavbam, torej celice, ki so v podatkih aerolaserskega skeniranja označene kot stavbe (kategorija 6) in imajo hkrati višino od tal višjo od 2 m. | 14 |
| Slika 6: Podatki kjer so z oranžno označene celice, ki pripadajo stavbam, po filtriranju s filtrom mediana. Opaziti je neskladje med katastrom stavb in podatki aerolaserskega skeniranja. | 15 |
| Slika 7: Potek izračuna velikosti, zasuka in nagiba segmentov streh. | 16 |
| Slika 8: Nagibi na strehi Osnovne Šole Toma Brejca v Kamniku. Piksle z nagibom večjim od 60° (rdeče) smo izločili iz nadaljnje obravnave, piksle z nagibom manjšim ali enakim 2° (svetlo zeleno) pa smo upoštevali kot svoj segment. | 17 |
| Slika 9: Zasuk na strehi Osnovne Šole Toma Brejca v Kamniku. Na ravnih strešnih ploskvah je opaziti zelo veliko variabilnost zasuka in posledično segmentov (slika 10). | 18 |
| Slika 10: Segmenti brez posebnega obravnavanja horizontalnih leg. Na ravnih strešnih ploskvah je opaziti zelo veliko število segmentov. | 18 |
| Slika 11: Segmenti po upoštevanju horizontalnih ploskev kot svoj segment in po združevanju severnih leg. | 18 |
| Slika 12: Segmenti po izločevanju manjših skupin pikslov. | 19 |
| Slika 13: Končni segmenti po upoštevanju njihove najmanjše velikosti. | 19 |

| | |
|--|----|
| Slika 14: Izračunani segmenti na vzorčnih stavbah..... | 20 |
| Slika 15: Primer stavbe za katero izračun ni bil uspešen (rdeč pravokotnik), saj v oblaku točk aerolaserskega skeniranja ni označena kot stavba (ni rdečih točk) in zato na rastru stavb ni razvidna. Na sliki je opaziti tudi primer, ko je stavba v oblaku točk označena (desno spodaj), a ni vpisana v kataster stavb. V zelenih tonih so označeni odboji z vegetacije, v rjavih pa odboji s tal.21 | |
| Slika 16: Deleži površin segmentov glede na zasuk..... | 22 |
| Slika 17: Deleži površin segmentov glede na naklon..... | 23 |

1.1 Seznam preglednic

| | |
|--|----|
| Preglednica 1: Vzorčne stavbe..... | 12 |
| Preglednica 2: Zapis izračunanih segmentov in njihovih atributov v končni tekstovni datoteki..... | 21 |
| Preglednica 3: Površine segmentov [1000 m ²] po razredih nagibov in zasuka. Najprimernejši razred za izkoriščanje sončne energije je pri zasuku na jug (zasuk 180°±15°) in pri naklonskem razredu 31°–33°. | 23 |