



Evropski kmetijski sklad za razvoj podeželja: Evropa investira v podeželje



Termografija kot orodje za preverjanje energetske učinkovitosti stavb

Inštitut za obnovljive vire energije in učinkovito rabo eksergije, INOVEKS d.o.o.
Cesta 2. grupe odredov 17, 1295 Ivančna Gorica, info@inoveks.si

Povzetek

V praksi se pogosto srečujemo z vprašanji o smiselnosti izvedbe termografije s katero želijo lastniki dokazovati energetske neučinkovitosti stavb. V prispevku prikazujemo kaj termografija sploh omogoča in v kakšnih primerih je sploh smiselna. Še posebej moramo biti pozorni pri izbiri izvajalca termografije, saj mora biti le-ta izvedena kakovostno in predvsem strokovno. Le ustrezno strokovno usposobljen izvajalec termografije bo namreč znal na termokameri in pri analizi določiti vse parametre, ki vplivajo na prenos toplote in s tem na prikaz površinske temperature merjenih sten. Določevanje vplivnih parametrov zahteva precej znanja oziroma poznavanje osnovnih mehanizmov prenosa toplote, zato ni dovolj samo kupiti opremo, ampak jo je potrebno tudi znati uporabljati.

UVOD

Termografija je v osnovi nekontaktna metoda za merjenje temperature. Tako jo lahko pri stavbah uporabimo za merjenje površinskih temperatur vidnih površin (sten, oken) stavbe. Z interpretiranjem in analizo prikaza toplotne oziroma termokamere lahko hitro opazimo anomalije na površini sten (toplotni mostovi, poškodovana ali slaba izolacija, nezadostna zrakotesnost, pojav vlage, odkrivanje poškodb v sistemih s toplo vodo) in na podlagi dobljenih termografov ocenimo stanje objekta ter načrtujemo morebitne sanacije in ukrepe.

Pojem termografija v osnovi opisuje infrardečo termografijo, s katero zajamemo slike in video posnetke, ki nam prikazujejo temperature površin. Termografske kamere zaznajo infrardeče elektromagnetno sevanje. To sevanje nato pretvorijo v slike, ki jih imenujemo termografi oziroma termogrami. Glede na teorijo sevanja črnega telesa, vsi objekti s temperaturo nad absolutno ničlo, sevajo infrardečo svetlobo in prav zaradi tega jih lahko s pomočjo termografske kamere vidimo tudi brez vidne svetlobe. Količina infrardečega sevanja, ki jo seva posamezen objekt, se povečuje s temperaturo, natančneje s četrto potenco absolutne temperature, kar se na termografskih posnetkih vidi kot gradient temperature. Na podlagi temperaturnega gradienta se lepo vidijo razlike med različno toplimi telesi oziroma deli teles, ki se nato s smiselno interpretacijo uporabijo za uspešno termografsko analizo.

V praksi se za opis termografije uporablja tudi termin »termovizija«. Termin termovizija se najpogosteje uporablja kot sinonim za vizualizacijo temperatur (npr. za vojaške potrebe), termografija pa za natančno merjenje površinskih temperatur s pomočjo enakega fizikalnega principa. Pri tem je

potrebno poudariti, da za kakovostno termografijo ni dovolj le dobra oprema, ampak je kakovostna izvedba možna le ob hkratni določitvi veliko vplivnih parametrov (emisivnost merjenih površin, sevanje neba in drugih vremenskih pogojev).

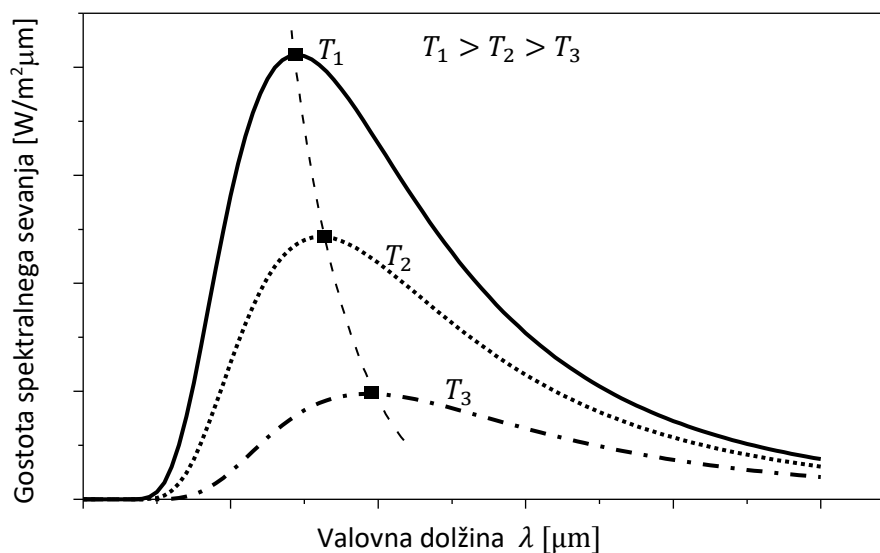
Zunanja termografija se praviloma izvaja ob ustreznem vremenu v hladnem obdobju leta, ko je stavba ogrevana in je temperaturna razlika med notranjim ogrevanim prostorom in zunanostjo ustrezna. Notranjo termografijo je možno opraviti praktično kadarkoli in je skoraj neodvisna od zunanjih vplivov.

TEORETIČNE OSNOVE SEVANJA TOPLOTE [1]

Če želimo razumeti merjenje s termokamero, moramo poznati osnove prenosa toplote s sevanjem. Sevanje toplote je elektromagnetno sevanje toplega telesa. Vsa trdna telesa in kapljevine, pa tudi nekateri plini, sevajo toploto. Sevanje toplote za prenos toplote ne potrebuje snovi, kot je to potrebno pri prevodu toplote. Sevanje toplote je najbolj učinkovito v vakuumu. Toplotno sevanje zajema valovne dolžine od nekaj μm do $1000 \mu\text{m}$ (slika 1), pri čemer velja Wienov zakon, ki pravi da je zmnožek valovne dolžine vrha spektralne gostote sevanja črnega telesa in njegove absolutne temperature konstanten. Za sevanje sonca s temperaturo okoli 5800 K je spektralni vrh pri valovni dolžini $501,5$ nanometra. Gostoto toplotnega toka popišemo s Stefanovim zakonom, ki ga je uvedel naš rojak Jožef Štefan, ki popiše sevanje absolutno črnega telesa:

$$\dot{q} = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

V enačbi (1) je σ Stefan-Boltzmanova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$.

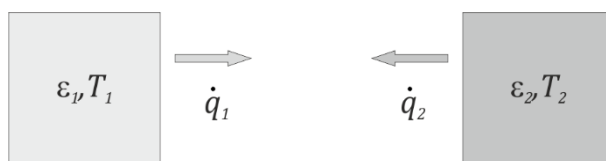


Slika 1: Spektralna gostota črnega telesa za različne temperature [1]

Ker pa telesa v praksi niso idealno črna, je Stefanov zakon ustrezno modificiran in velja zakon za siva telesa:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

ε je emisivnost površine, ki je lahko med 0 in 1. Ko si dve idealno črni površini izmenjujeta toploto, je neto izmenjana toplota proporcionalna diferenci razlike temperatur teles na četrto potenco.



Slika 2: Sevanje dveh sivih teles, eno na drugo [1]

Če sivo telo 1 "vidi" samo telo 2, potem je izmenjani toplotni tok s prvega telesa na drugo:

$$\dot{q}_1 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_1^4 \quad (3)$$

Če drugo telo ni idealno črno, je treba pri sprejemu toplote upoštevati še emisivnost oziroma absorbtivnost površin a , ki je lahko med 0 in 1. Drugo telo sprejme:

$$\dot{q}_2 = a \cdot \dot{q}_1 \quad (4)$$

Za siva telesa velja Kirchhoffov zakon sevanja, ki pravi, da je emisivnost ε enaka absorbtivnosti a :

$$\varepsilon = a \quad (5)$$

Če se toplota med telesoma 1 in 2 prenaša s sevanjem, je neto izmenjana gostota toplotnega toka med tesli proporcionalna razliki temperatur teles na četrto potenco, kar lahko zapišemo:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_1^4 - T_2^4] \quad (6)$$

Ključno za pravilno določanje gostote toplotnega toka ter s tem temperature površine, ki seva toploto, je torej določitev emisivnosti. To vrednost mora izvajalec termografije natančno določiti pred samo termografijo. Tabela 1 prikazuje okvirne vrednosti emisivnosti različnih materialov. Iz tabele je razvidno, da imajo različni materiali različno emisivnost, pri čemer je pomembna tudi temperatura površin.

Za natančno merjenje temperature upoštevamo vplive različnih parametrov na meritev sevanja oziroma temperature merjenca. Osnovne lastnosti, ki vplivajo na našo meritev so:

- emisivnost površine,
- temperatura okolice,
- razdalja med objektom in kamero,
- relativna vlažnost,
- odsevalna temperatura okolice z merjenca na kamero (reflected apparent temperature).

Zelo pomemben je parameter odsevalna temperatura okolice z merjenca na kamero (reflected apparent temperature). Kamera na mestu meritve namreč prejme vedno tudi del sevanja okolice, ki ga merjenec odbije in s tem izmerimo drugačno temperaturo, kot jo ima merjena površina.

Tabela 1: Emisivnost nekaterih materialov [1, 2]

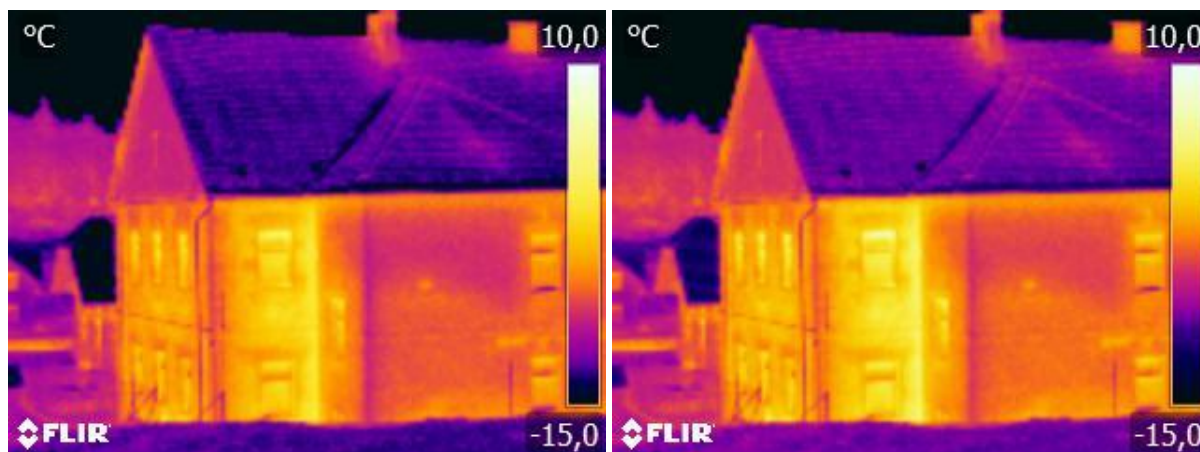
Material	Opis	Temperatura [°C]	Emisivnost [ε]
Aluminij	anodiziran zvitek	100	0,55
Aluminij	plošča	100	0,09
Aluminij	zvitek	100	0,09
Aluminij	močno oksidiran	50–500	0,2–0,3
Aluminij	poliran	50–100	0,04–0,06
Aluminij	poliran, zvitek	100	0,05
Aluminij	poliran, plošča	100	0,05
Aluminij	hrapava površina	20–50	0,06–0,07
Lakirana površina	črna	40–100	0,96–0,98
Lakirana površina	črna, mat	100	0,97
Lakirana površina	črna, svetleča, barvano jeklo	20	0,87
Lakirana površina	toplotno odporen	100	0,92
Lakirana površina	bela	40–100	0,8–0,95
Lakirana površina	bela	100	0,92
Les	tla		0,5–0,7
Omet	groba površina	20	0,91
Opeka	silikatna	1100	0,85
Opeka	šamot	20	0,85
Opeka	šamot	1000	0,75
Opeka	šamot	1200	0,59
Opeka	fasadna	20	0,94
Opeka	rdeča, običajna	20	0,93
Opeka	rdeča, hrapava	20	0,88–0,93

Slika 3 prikazuje termograf stavbe. Na levi strani je nastavljena emisivnost 0,50, na desni strani pa 0,92, kar je realna vrednost. Iz slike je jasno razvidna razlika v prikazu zaradi različnih emisivnosti.



Slika 3: Grafični prikaz vpliva emisivnosti

Slika 4 prikazuje termograf stavbe. Na levi in desni strani slike je nastavljena emisivnost 0,92, pri čemer je na levi strani nastavljena odsevalna temperatura 10 °C, na desni strani pa -10 °C. Zopet je vidna razlika v prikazu površinskih temperatur.



Slika 4: Grafični prikaz vpliva odsevalne temperatura

Pri določitvi emisivnosti si na terenu lahko pomagamo s trakom, ki ima znano emisivnost. To pomeni, da na površino namestimo trak in počakamo nekaj minut, da je temperatura traku enaka kot je površinska temperatura v okolici traku. Nato izmerimo temperaturo na traku in zraven traku. Ker poznamo emisivnost traku, lahko na mestu, kjer je nameščen trak, določimo temperaturo. Nato spreminjamo emisivnost na mestu brez traku, dokler ni temperatura enaka, kot smo jo izmerili na mestu s trakom. Tako praktično določimo emisivnost površine.

Za določitev odsevalne temperature se lahko poslužimo naslednje tehnike:

1. Nastavimo emisivnost na 1.
2. Nastavi razdaljo do merjenega objekta na 0.
3. Izmerimo odsevalno temperaturo z mesta merjenja s pomočjo ALU folije.

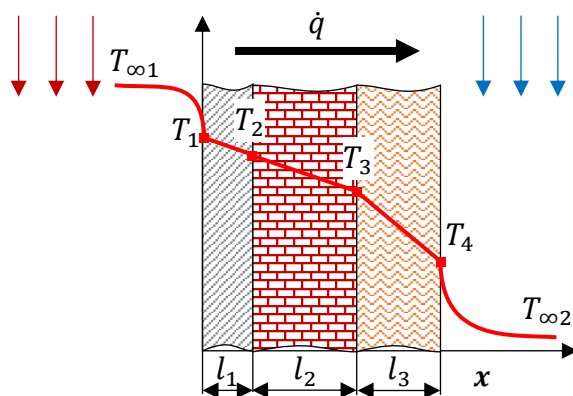
TERMOGRAFIJA PRI IZOLIRANI IN NEIZOLIRANI HIŠI [1]

Ko se odločamo za termografijo, se je potrebno zavedati kakšna je pričakovana temperatura stavbe pri različnih zunanjih pogojih. V predhodnih strokovnih prispevkih [3, 4] smo predstavili kako se lotiti sanacije hiše. Za konstrukcijo stene, predstavljene v prispevku bomo analizirali kakšna je pričakovana zunanja temperatura stene.

Slika 5 prikazuje primer enodimenzijskega stacionarnega prehoda toplote skozi konstrukcijo, ki ima tri plasti, pri čemer velja, da je temperatura zraka na notranji strani $T_{\infty 1}$ višja od temperature zraka zunaj $T_{\infty 2}$, $T_{\infty 1} > T_{\infty 2}$. Toplotni tok skozi posamezno konstrukcijo s površino A popišemo z enačbo:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_{\infty 1} - T_{\infty 2}) \quad (7)$$

V zgornji enačbi je U toplotna prehodnost posamezne konstrukcije, ki ima fizikalno enoto $W/(m^2K)$ in A pripadajoča površina v m^2 .



Slika 5: Enodimenzijski stacionarni prehod toplote skozi večplastno konstrukcijo [1]

Tabela 2 prikazuje sestavo sten, pri katerih bomo analizirali pričakovano površinsko temperaturo pri različnih zunanjih pogojih.

Tabela 2: Lastnosti neizolirane in izolirane stene (od notranjosti navzven) [3, 4]

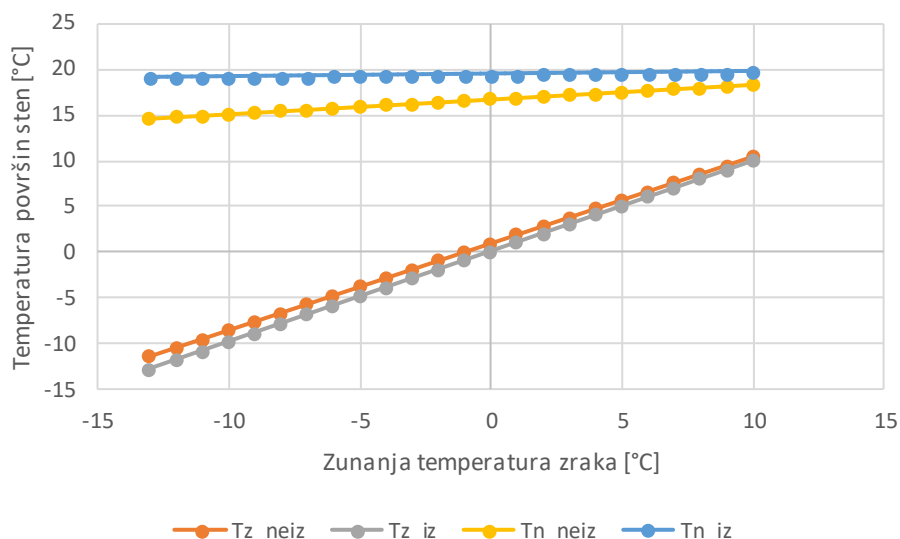
Sestava neizolirane stene	<ol style="list-style-type: none"> 1. Podaljšana apnena malta 1800 – 1 cm 2. Apnena malta 1600 – 1,5 cm 3. Mrežasta in votla opeka 1200 – 29 cm 4. Pigmentna fasadna malta – 0,7 cm
Sestava izolirane stene	<ol style="list-style-type: none"> 1. Podaljšana apnena malta 1800 – 1 cm 2. Apnena malta 1600 – 1,5 cm 3. Mrežasta in votla opeka 1200 – 29 cm 4. Grafitni stiropor – 12 cm 5. Pigmentna fasadna malta – 0,7 cm

Tabela 3 prikazuje toplotno prehodnost izolirane in neizolirane stene. Neizolirana stena ima toplotno prehodnost 1,295 W/(m²K), izolirana stena pa 0,221 W/(m²K), ki vključujeta standardno toplotno pristopnost na zunanji strani 25 W/(m²K) in notranji strani 7,7 W/(m²K).

Tabela 3: Izračunana in dovoljena toplotna prehodnost gradbenih konstrukcij analiziranega objekta

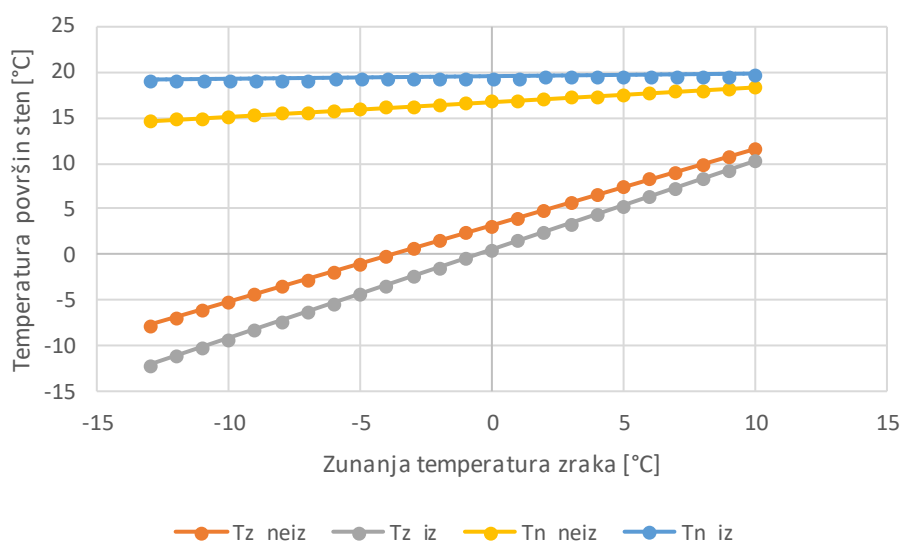
Konstrukcija		U_{dej} [W/(m ² K)]
1.	Neizolirana stena	1,295
2.	Izolirana stena	0,221

Analizirajmo kakšna je pričakovana temperatura stene pri stacionarnih pogojih, ko je toplotna prestopnost na zunanji strani 25 W/(m²K), in ko imamo neizolirano in izolirano steno za različne zunanje temperature zunanjega zraka (Slika 6). Toplotna prestopnost 25 W/(m²K) ustreza visokim zunanjim hitrostim zraka. Ugotovimo lahko, da je pričakovana razlika temperature med izolirano in neizolirano steno na zunanji strani pri zunanji temperaturi zraka 0 °C 0,86 °C, pri čemer ima izolirana stena nižjo temperaturo od neizolirane. Pri tej temperaturi je razlika na notranji strani 2,69 °C, pri čemer ima izolirana stena višjo temperaturo od neizolirane. Ta ugotovitev je zelo pomembna, saj kaže na to, da mora biti merilna oprema (kamera) sposobna izmeriti zelo majhno razliko temperatur, če želimo sklepati o tem ali je stavba izolirana ali ne. Na notranji strani stavbe je razlika izrazitejša.



Slika 6: Prikaz razlike med pričakovano površinsko temperaturo na zunanji (indeks z) in notranji strani (indeks n) za neizolirano(indeks neiz) in izolirano steno (indeks iz), ko je toplotna prestopnost na zunanji strani 25 W/(m²K)

Slika 7 prikazuje analizo, kakšna je pričakovana temperatura stene pri stacionarnih pogojih, ko je toplotna prestopnost na zunanji strani 8 W/(m²K) za enak primer. Toplotna prestopnost 8 W/(m²K) ustreza nizkim zunanjim hitrostim zraka. Ugotovimo lahko, da je pričakovana razlika temperature med izolirano in neizolirano steno na zunanji strani pri zunanji temperaturi zraka 0 °C 2,69 °C, pri čemer ima izolirana stena nižjo temperaturo od neizolirane. Pri tej temperaturi je razlika na notranji strani ravno tako 2,69 °C, pri čemer ima izolirana stena višjo temperaturo od neizolirane. Tudi ta ugotovitev je zelo pomembna, saj kaže na to, da izmerimo izrazitejšo razliko temperature med izolirano in neizolirano površino v brezvetrju.



Slika 7: Prikaz razlike med pričakovano površinsko temperaturo na zunanji (indeks z) in notranji strani (indeks n) za neizolirano(indeks neiz) in izolirano steno (indeks iz), ko je toplotna prestopnost na zunanji strani 8 W/(m²K)

ZAKLJUČEK

V prispevku smo prikazali osnove termografije oziroma brezkontaktnega merjenja temperatur in kateri faktorji so pomembni pri vrednotenju termografov stavb. Zelo pomembno je, da se termografija stavbe izvede pod nadzorovanimi pogoji, ko je zunaj dovolj nizka temperaturna razlika ter pod nadzorovanimi vplivnimi parametri. V nasprotnem primeru še vedno lahko izvedemo termovizijo stavbe kot vizualizacijo morebitnih toplotnih mostov.

Termografija kot orodje energetske (ne)učinkovitosti v prvi fazi detektiranja energetske učinkovitosti običajno ni potrebna. V prvi fazi lahko preprosto izračunamo povprečno rabo energije za delovanje stavbe, ki bazira na računih za električno energijo in preostale energente, ki jih uporabljamo. S tem lahko določimo v kateri razred spada naša stavba. Termografija nam v tej fazi sicer lahko vizualizira toplotne mostove oziroma nehomogenosti v površinskih temperaturah naših stavb, ki pa so pri neizoliranih stavbah pričakovani in vedno prisotni. Zelo pa je pomembna pri kontroli izvedbe energetske sanacije objekta. V tej fazi pa nam lahko le termografija odkrije nehomogenosti na ovoju, ki so posledica morebitne nekakovostne izvedbe oziroma vgradnje toplotne izolacije.

LITERATURA

- [1] MUHIČ, Simon. *Prenos toplote in snovi v stavbah*. Novo mesto: Fakulteta za tehnologije in sisteme, 2017. ISBN 978-961-6770-38-5.
- [2] FLIR SYSTEMS INC. *Flir Exx Series: User's Manual*. B.m.: Flir Systems Inc., 2010.
- [3] INŠTITUT ZA OBNOVLJIVE VIRE ENERGIJE IN UČINKOVITO RABO EKSERGIJE INOVEKS D.O.O. *Kako se pravilno lotiti energetske sanacije energijsko zelo potratne hiše?* [na spletu]. 2019. Dostopno: https://www.inoveks.si/images/inUREinOVE/strokovniprispevki/01_Kako_se_pravilno_lotiti_energetske_sanacije_potratne_hise.pdf
- [4] INŠTITUT ZA OBNOVLJIVE VIRE ENERGIJE IN UČINKOVITO RABO EKSERGIJE INOVEKS D.O.O. *Kako se pravilno lotiti energetske sanacije tipične stanovanjske hiše?* [na spletu]. 2019. Dostopno: https://www.inoveks.si/images/inOVEinURE/strokovniprispevki/02_Kako_se_pravilno_lotiti_energetske_sanacije_tipicne_stanovanjske_hise.pdf

OPOMBA

Operacija Informiranje in ozaveščanje o potencialu učinkovite rabe energije in obnovljivih virov energije za sonaravni razvoj (in.OVE.in.URE) je bila potrjena na drugem Javnem pozivu za izbor operacij za uresničevanje ciljev Strategije lokalnega razvoja na območju LAS STIK v letu 2017.