



Evropski kmetijski sklad za razvoj podeželja: Evropa investira v podeželje



## Prehod vlage skozi gradbene konstrukcije

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

### Povzetek

V praksi se pogosto srečujemo z vprašanji o prenosu snovi skozi gradbene konstrukcije. V prispevku prikazujemo osnovne zakonitosti prenosa snovi oziroma vodne pare skozi gradbene konstrukcije. V prvem delu članka podajamo osnove popisa vlažnega zraka. V drugem delu članka pa so prikazane osnove kako se preveri difuzija vodne pare skozi gradbene konstrukcije ter kako in kam se namesti parna zapora, če v konstrukciji pride do kondenzacije.

### UVOD

Gradbene konstrukcije se navlažijo, če so v stiku z vodo ali vodno paro. Navlažujejo se porozne snovi, ki imajo v svoji strukturi drobne pore, v katerih so v normalnem stanju zrak in omejeno število molekul vodne pare. O navlaževanju gradbenih konstrukcij govorimo takrat, ko je preseženo tako imenovano higroskopsko ravnotežje. To je stanje snovi, ko so molekule vodne pare v porah gradbene snovi v energijskem ravnotežju z okolico. Vzroki navlaževanja oziroma vlažnosti gradbenih konstrukcij so [1]:

- prehod vode v pore iz tal ali meteorolnih padavin;
- hidrostatični tlak vode v primeru, ko so površine konstrukcij v vodi (na primer stene bazenov ali vodnih rezervoarjev);
- poškodbe, kot so puščanje vodovodnih ali odtočnih cevi;
- visoke vlažnosti zraka, ki je v stiku s konstrukcijo zaradi virov vodne pare v stavbi (človek, sušenje perila ...);
- kondenzacija vodne pare iz zraka na površini konstrukcije;
- kondenzacija vodne pare, ki se lahko pojavi pri procesu difuzije molekul skozi konstrukcijo;
- vlažnost je posledica "vgrajene" vlage, ki ostane v konstrukciji po gradnji.

Navlaževanje gradbenih konstrukcij je nezaželeno iz več razlogov. Med te razloge štejemo zlasti:

- Vlažne konstrukcije povečujejo vlažnost zraka v stavbi in ustvarjajo pogoje za razvoj mikroorganizmov – sindrom bolnih stavb.

- Snovem se poveča toplotna prevodnost. Ker je večina toplotnih izolacij poroznih, te delno izgubijo svojo funkcijo.
- Spremenijo se mehanske lastnosti. Večina gradbenih snovi se razteza, ko se navlažujejo, kar povzroča dodatne mehanske obremenitve. Povečajo se stroški vzdrževanja, saj gradbene snovi, ki so preveč navlažene ali so v stiku z vodo, razpadejo, rjavijo ...

V zraku je vedno prisotna vodna para. Med področji z različnim parcialnim ali delnim tlakom vodne pare se pojavi difuzijski tok molekul vodne pare, vse dokler se delni tlaki vodne pare ne izenačijo, kar opisuje Fickov zakon prenosa snovi. Prehod snovi je seveda odvisen od količine vodne pare v zraku. Tok vodne pare se vzpostavi v smeri proti nižjemu tlaku. Ker se pozimi, ko je difuzija vodne pare iz notranjosti največja, zmanjšuje tudi temperatura v slojih stene, lahko pride do kondenziranja vodne pare iz difuzijskega toka. Tlak nasičenja vodne pare, ki je funkcija temperature, mora biti višji od dejanskega tlaka vodne pare, ki difundira skozi konstrukcijo. Največja možna količina vodne pare v zraku je namreč določena s tlakom nasičenja, ki je funkcija temperature. Vse stavbe morajo biti grajene tako, da vodna para, ki zaradi difuzije prodira skozi gradbene konstrukcije ovoja stavbe, v konstrukciji ne kondenzira. Če pa pride do kondenzacije, se mora konstrukcija po koncu difuzijskega navlaževanja in izsuševanja povsem izsušiti.

## VLAŽEN ZRAK IN NJEGOV POPIS [1, 2]

Vlažen zrak je zmes suhega zraka (v nadaljevanju označeno z indeksom  $zr$ ) in vode (v nadaljevanju označeno z indeksom  $w$ ). Pri preobrazbah vlažnega zraka se masa suhega zraka  $m_{zr}$  v splošnem ne spreminja, količina vlage v zraku  $m_w$  pa se zaradi kondenzacije lahko spreminja. Zato vpeljemo za opis sestave vlažnega zraka vlažnost  $x$  [2]:

$$x = \frac{m_w}{m_{zr}} = 0,622 \cdot \frac{p_w}{p - p_w} \quad (1)$$

Pri  $x = 0$  je zrak suh, pri  $x = \infty$  je čista voda (kapljevina, para ali led). Relativna vlažnost zraka  $\varphi$  je odvisna od temperature in je definirana z razmerjem absolutnih vlažnosti oziroma parcialnih tlakov:

$$\varphi = \frac{\rho_w(T)}{\rho_{ws}(T)} = \frac{p_w(T)}{p_s(T)} \quad (2)$$

Zrak pri določeni temperaturi lahko nase sprejme samo določeno količino vlage. Ta meja se imenuje meja nasičenja, ki jo lahko popišemo s tlakom nasičenja,  $p_s$ . Pri nenasičenem zraku je  $\varphi < 1$ , pri nasičenem je  $\varphi = 1$ . Stanje vlažnega zraka torej lahko opišemo s tremi veličinami stanja: temperaturo  $T$ , tlakom  $p$  in vlažnostjo  $x$ . Pri vlažnem zraku v osnovi razlikujemo tri področja obravnave [2]:

1. Nenasičen vlažen zrak: obe komponenti sta v plinasti fazi, torej imamo zmes dveh idealnih plinov. Voda je v stanju pregrete pare, zato je parcialni tlak vodne pare nižji od tlaka nasičenja  $p_s$ :

$$p_w(T) < p_s(T) \quad (3)$$

- Nasičen vlažen zrak s kapljevitim kondenzatom: v tem primeru je temperatura višja od 0 °C. Zmes je sestavljena iz suhe pare in vode kot megle ali zbrane na dnu posode kot kondenzat. Parcialni tlak vodne pare je v tem primeru enak tlaku nasičenja:

$$p_w(T) = p_s(T) \quad (4)$$

- Nasičen vlažen zrak s trdnim kondenzatom: v tem primeru je temperatura nižja od 0 °C. Zmes vsebuje poleg suhe pare še led, običajno kot srež ali ledeno meglo.

Tlak nasičenja v odvisnosti od temperature lahko izračunamo z enačbama, in sicer [3]:

- za temperaturno območje  $-20\text{ °C} \leq t \leq -0,01\text{ °C}$ :

$$p_s = 611 \cdot e^{(-4,909965 \cdot 10^{-4} + 8,183197 \cdot 10^{-2} \cdot t - 5,552967 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 2,228376 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 6,211808 \cdot 10^{-7} \cdot t^4)} \quad (5)$$

- za temperaturno območje  $0\text{ °C} \leq t \leq 100\text{ °C}$ :

$$p_s = 611 \cdot e^{(-1,91275 \cdot 10^{-4} + 7,258 \cdot 10^{-2} \cdot t - 2,939 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 9,841 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 1,92 \cdot 10^{-9} \cdot t^4)} \quad (6)$$

Pri tem se v enačbah (5) in (6) temperatura podaja v °C, tlak pa je izračunan v Pa. S pomočjo teh dveh enačb in enačbe (2) lahko pri določeni temperaturi izračunamo parcialni tlak vodne pare  $p_w(T)$  in nato tudi vlažnost  $x$ , ki nam pove koliko gramov vode imamo v kilogramu zraka. Za lažji opis pa si navadno pomagamo kar z Mollierovim  $h-x$  diagramom.

## PREVERBA GRADBENIH KONSTRUKCIJ

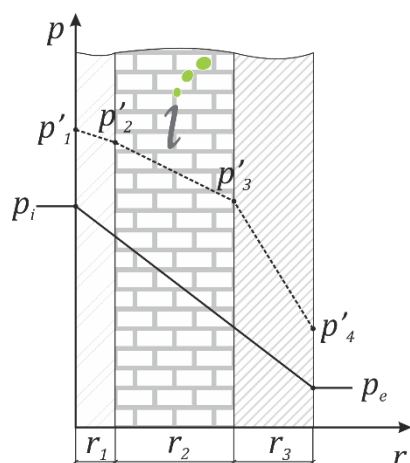
Za preveritev ustreznosti gradbene konstrukcije uporabljamo enostaven postopek, kjer lineariziramo potek tlakov vodne pare v gradbeni konstrukciji s pomočjo relativne difuzijske upornosti prehodu vodne pare  $r$ , ki jo določimo za vsak sloj gradbene konstrukcije z izrazom:

$$r_j = l_j \cdot \mu_j \quad (7)$$

V zgornji enačbi je  $l_j$  debelina posameznega sloja,  $\mu_j$  pa predstavlja difuzijsko upornost prehodu vodne pare, ki je snovska lastnost, določena eksperimentalno. Na podlagi izračuna naredimo grafikon  $p-r$  (slika 1). Za vsak sloj konstrukcije izračunamo temperaturo na meji slojev in določimo tlak nasičenja pri tej temperaturi. Nato preverimo, ali je tlak nasičenja večji od parcialnega tlaka vodne pare. Pri tem predpostavimo linearni potek tlaka, ki ga izračunamo s pomočjo enačbe premice.

Na splošno so možni trije primeri:

- v gradbeni konstrukciji ne pride do kondenzacije vodne pare (slika 1);
- v gradbeni konstrukciji pride do kondenzacije vodne pare v ravnini (slika 2);
- v gradbeni konstrukciji pride do kondenzacije vodne pare v coni (slika 3).



Slika 1: Difuzija vodne pare [1]

Tlak nasičenja v odvisnosti od temperature lahko izračunamo z enačbama (5) in (6). Dejanske tlake v konstrukciji opredelimo z dvema mejnima parametroma, in sicer:

1. s tlakom vodne pare v zraku v prostoru z ustrezno notranjo temperaturo;
2. s tlakom vodne pare v zunanjem zraku z ustrezno zunanjo projektno temperaturo.

Tehnična smernica TSG-1-004 [4] določa notranjo temperaturo  $t(i) = 20 \text{ °C}$  in relativno vlažnost notranjega zraka  $\varphi(i) = 65 \%$ , zunanji projektni pogoji pa so določeni v klimatskih podatkih za posamezno lokacijo obravnave, in sicer na mesečni ravni (tabela 1). Za račun higrotermičnih lastnosti konstrukcij se sicer uporablja metoda, ki jo predpisuje standard [5].

Tabela 1: Tipični vremenski podatki za Ivančno Gorico [6]

Mesec	Zunanja temperatura [°C]	Relativna vlažnost [%]
Januar	-1	82
Februar	1	76
Marec	5	72
April	9	70
Maj	14	73
Junij	17	73
Julij	19	73
Avgust	19	75
September	15	80
Oktober	10	82
November	4	84
December	0	85
Letno povprečje	9,4	77

Standard določa preračun na mesečni ravni. Pri izračunu difuzije vodne pare skozi gradbene konstrukcije se vzame podatek za notranje pogoje iz pravilnika oziroma iz projektne naloge. Tako lahko za dejanski tlak v prostoru izračunamo:

$$p_i = p'(t_i) \cdot \varphi_i \quad (8)$$

Če predpostavimo vrednosti  $t(i) = 20 \text{ °C}$  in relativno vlažnost notranjega zraka  $\varphi(i) = 65 \%$ , potem lahko izračunamo:

$$p_i = 2337 \cdot 0,65 = 1519 \text{ Pa} \quad (9)$$

Analogno lahko za tlak zunaj stavbe izračunamo:

$$p_e = p'(t_e) \cdot \varphi_e \quad (10)$$

Za Ivančno Gorico, za mesec januar lahko s pomočjo podatkov iz zgornje tabele (Tabela 1) izračunamo:

$$p_e = 513 \cdot 0,82 = 461 \text{ Pa} \quad (11)$$

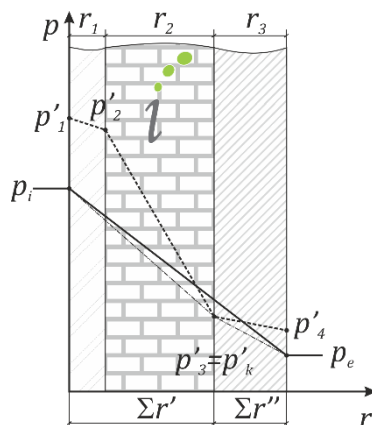
Gostota v konstrukcijo vstopajočega toka vodne pare se izračuna [1]:

$$q_m = 0,62 \frac{p_i - p_e}{\sum r} \quad (12)$$

0,62 predstavlja vrednost difuzijske prevodnosti vodne pare v zraku s povprečno srednjo letno temperaturo konstrukcije 6–7 °C. V enačbi (12) se  $p_i$  in  $p_e$  podata v [kPa], difuzijska upornost pa v [m], izračunani masni tok vodne pare ima enoto [g/m<sup>2</sup>h]. Če kondenzacije v gradbeni konstrukciji ni, je vstopajoči tok  $q_{m1}$  vodne pare enak izstopajočemu  $q_{m2}$ :

$$q_{m1} = q_{m2} = 0,62 \cdot \frac{p_i - p_e}{\sum r} \quad (13)$$

Slika 2 prikazuje primer, ko v gradbeni konstrukciji pride do kondenzacije vodne pare v ravnini. Če je na enem izmed stikov dveh sosednjih slojev dejanski tlak vodne pare računsko višji od tlaka nasičenja, potem tam vodna para kondenzira in ostaja v konstrukciji.



Slika 2: Difuzija vodne pare – kondenzacija v ravnini [1]

Gostota v konstrukcijo vstopajočega toka vodne pare se izračuna:

$$q_{m1} = 0,62 \cdot \frac{p_i - p'_k}{\sum r'} \quad (14)$$

V enačbi (14) sta  $p'_k$  tlak nasičenja pri temperaturi ravnine kondenzacije in  $\sum r'$  vsota relativnih difuzijskih upornosti prehodu vodne pare za sloje na notranji strani ravnine kondenzacije. Gostota iz konstrukcije izstopajočega toka vodne pare se izračuna:

$$q_{m2} = 0,62 \frac{p'_k - p_e}{\sum r''} \quad (15)$$

V enačbi (15) je  $\sum r''$  vsota relativnih difuzijskih upornosti prehodu vodne pare za sloje na zunanji strani ravnine kondenzacije. Pri tem velja:

$$\sum r = r' + r'' \quad (16)$$

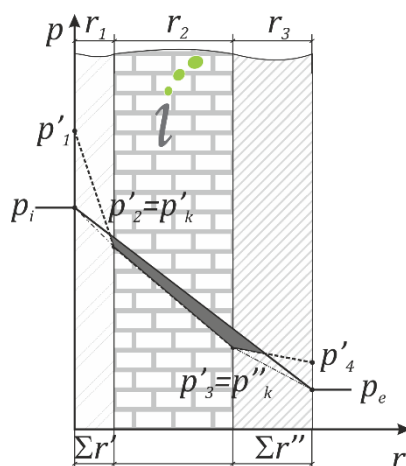
Količina kondenza se izračuna:

$$q'_m = q_{m1} - q_{m2} \quad (17)$$

Slika 3 prikazuje primer, ko v gradbeni konstrukciji pride do kondenzacije vodne pare v coni. Če je na obeh stikih enega izmed slojev dejanski tlak vodne pare računsko višji od tlaka nasičenja, potem vodna para kondenzira v celotni coni materiala. Gostota v konstrukcijo vstopajočega toka vodne pare se izračuna:

$$q_{m1} = 0,62 \frac{p_i - p'_k}{\sum r'} \quad (18)$$

V enačbi (18) sta  $p'_k$  tlak nasičenja pri temperaturi ravnine kondenzacije in  $\sum r'$  vsota relativnih difuzijskih upornosti prehodu vodne pare za sloje na notranji strani kondenzacijskega sloja.



Slika 3: Difuzija vodne pare – kondenzacija v coni [1]

Gostota iz konstrukcije izstopajočega toka vodne pare se izračuna:

$$q_{m2} = 0,62 \frac{p''_k - p_e}{\sum r''} \quad (19)$$

V enačbi (19) je  $\sum r''$  vsota relativnih difuzijskih upornosti prehodu vodne pare za sloje na zunanji strani kondenzacijskega sloja. Pri tem velja:

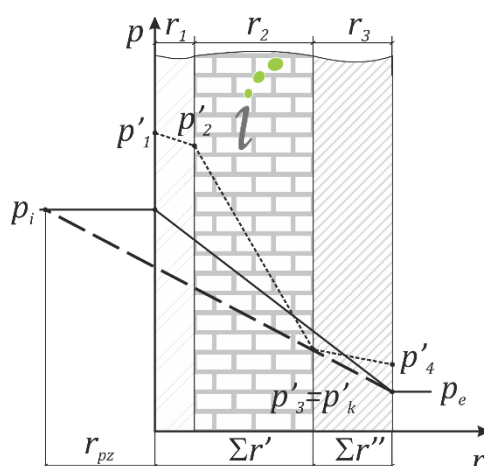
$$\sum r \neq r' + r'' \quad (20)$$

Količina kondenza se izračuna:

$$q'_m = q_{m1} - q_{m2} \quad (21)$$

### NAMESTITEV PARNE ZAPORE

Če bi lahko prišlo do kondenzacije pare v konstrukciji, je potrebno preprečiti vstop vodne pare v konstrukcijo. To storimo z materiali, ki imajo veliko difuzijsko upornost prehoda vodne pare, ki jih praviloma namestimo na notranji strani gradbene konstrukcije. Materiali, ki imajo veliko difuzijsko upornost, so PVC, polietilenske in kovinske folije. Parna zapora je v primerjavi z drugimi materiali navadno tanka, zato je ne upoštevamo pri preračunu prenosa toplote. Postopek določitve debeline parne zapore lahko izvedemo grafično ali pa računsko. Slika 4 prikazuje grafični postopek določitve debeline parne zapore.



Slika 4: Postopek določitve debeline parne zapore [1]

Tlak nasičenja vodne pare je na zunanji strani ostal nespremenjen. Če ne želimo kondenzacije vodne pare, potem iz točke  $p_e$  na zunanji strani potegnemo premico skozi točko  $p'_k$ . Kjer se premica seka s tlakom  $p_i$ , dobimo točko, ki določa minimalno potrebno dodatno upornost prehodu vodne pare  $r_{pz}$ , ki jo dobimo z vgradnjo parne zapore. Podatek odčitamo z grafa, ki ga v ta namen seveda narišemo v ustreznem merilu. Debelino parne zapore določimo:

$$l_{pz} \geq \frac{r_{pz}}{\mu_{pz}} \quad (22)$$

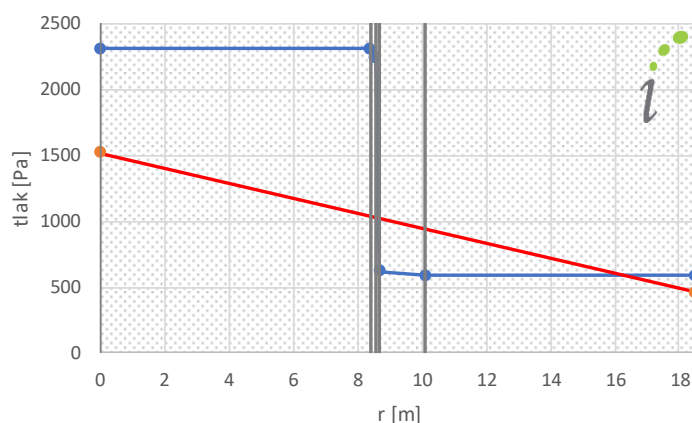
## PRIMER KONTROLE DIFUZIJE VODNE PARE SKOZI KONSTRUKCIJO

Predpostavimo, da na objekt v Ivančni Gorici namesto kritine namestimo PVC folijo (npr. zaradi naravne nesreče). V konstrukciji smo imeli pred tem pravilno nameščeno parno zaporo. Pojavlja se vprašanje ali moramo folijo pred namestitvijo kritine odstraniti oziroma jo lahko pustimo pod kritino. Tabela 2 prikazuje sestavo analizirane konstrukcije, in sicer po namestitvi PVC folije na zunanjo stran.

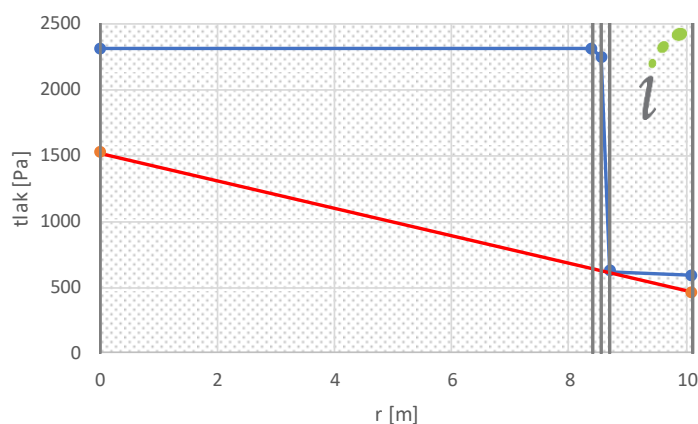
Tabela 2: Sestava analizirane konstrukcije (od notranje strani navzven)

	Debelina [m]
Lesena obloga	0,015
PVC folija	0,0002
Izolacija	0,14
Les, smreka	0,02
PVC folija	0,0002

Slika 5 prikazuje  $p-r$  diagram za analizirani primer. Iz diagrama je razvidno, da PVC folija, ki je nameščena na zunanji strani konstrukcije, povzroči kondenzacijo v coni. Zato je potrebno PVC folijo na zunanji strani pred namestitvijo kritine obvezno odstraniti. Slika 6 prikazuje stanje po odstranitvi zunanje folije. V konstrukciji ne prihaja več do kondenzacije.



Slika 5: Kondenzacija v coni (z nameščeno zunanjo folijo)



Slika 6: Stanje brez kondenzacije v analizirani konstrukciji (po odstranitvi folije)



## ZAKLJUČEK

V prispevku so prikazane strokovne osnove popisa vlažnega zraka. Okoliški zrak je namreč zmes suhega zraka in vodne pare. Vodne pare je v zraku relativno malo, zato za popis uporabimo kar enačbe za idealni plin. Pri popisu je pomembno razlikovati med vlažnostjo  $x$  in relativno vlažnostjo  $\varphi$ . Relativna vlažnost je namreč odvisna od temperature medtem, ko vlažnost  $x$  ni. Zato nam na primer pri nespremenjeni vlažnosti  $x$  relativna vlažnost spreminja skozi dan v odvisnosti od temperature.

V kolikor po kontroli difuzije vodne pare pride do kondenzacije, moramo namestiti parno zaporo. To storimo z ustreznimi materiali (parnimi zaporami), ki jih praviloma namestimo na notranji (topli) strani gradbene konstrukcije.

V kolikor na strešno konstrukcijo objekta namestimo začasno PVC folijo, jo je potrebno pred namestitvijo kritine odstraniti. V kolikor pa uporabimo paroprepusten material, lahko ostane na objektu, pod kritino.

## 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] MUHIČ, Simon in Bogdan BLAGOJEVIČ. *Tehniška termodinamika*. Novo mesto: Fakulteta za tehnologije in sisteme, 2016. ISBN 978-961-6770-34-7.
- [3] GLÜCK, Bernd. *Zustands- und Stoffwerte, Wasser - Dampf - Luft*. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1991. ISBN 3-345-00487-9.
- [4] MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR. *Tehnična smernica TSG-1-004:2010. Učinkovita raba energije*. 2010
- [5] *SIST EN ISO 13788: Higrotermalno obnašanje sestavnih delov stavb in elementov stavb - Notranja površinska temperatura za preprečevanje kritične vlage na površini konstrukcije in kondenzacije v konstrukciji - Računska metoda*. 2013
- [6] MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR, Agencija RS za okolje. *Podatki za pravilnik o učinkoviti rabi energije* [na spletu]. [dostopano 16. 09. 2019].  
Dostopno: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/tables/pravilnik-ucinkoviti-rabi-energije/>

## 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.