

REŠEVANJE PROBLEMOV URBANEGA TOPLOTNEGA OTOKA IN VELIKE RABE ENERGIJE Z OZELENJENIMI KONSTRUKCIJSKIMI SKLOPI STAVB

GREEN BUILDING ELEMENTS AND THE URBAN HEAT-ISLAND EFFECT

izvleček

Ozelenjeni konstrukcijski sklopi stavb v zadnjih letih pridobivajo na popularnosti. Predstavljajo pasivne tehnologije, s katerimi rešujemo probleme modernih mest in pripomoremo k trajnostnem razvoju urbanega okolja. Članek bo preučil prispevek ozelenjenih konstrukcijskih sklopov stavb na reševanje urbanega toplotnega otoka in velike rabe energije v stavbah. Toplotna učinkovitost ozelenjenih konstrukcijskih sklopov je odvisna od klimatskih značilnosti lokacije, deleža vegetacije na stavbi in od geometrije urbanega okolja. Znižanje temperature zraka v urbanem okolju je največje v primeru stavbe z ozelenjenim ovojem, v toplejši klimi in ožjem urbanem kanjonu. V primeru strehe z ekstenzivno vegetacijo deluje temen substrat kot močan toplotni vir in povzroča višje temperature površin in zraka v primerjavi s klasično betonsko streho. Gostejša vegetacija deluje kot hladilni vir. Ozelenjeni konstrukcijski sklopi se lahko uporabljajo tudi za pasivno hlajenje, z 12–90 % energijskimi prihranki. Največji prihranki so doseženi v primeru toplotno neizolirane stavbe, v zadnjih nadstropjih stavbe in v vroči suhi klimi.

ključne besede

ozelenjeni konstrukcijski sklopi stavb, urbani toplotni otok, rabe energije v stavbi, bioklimatsko načrtovanje

abstract

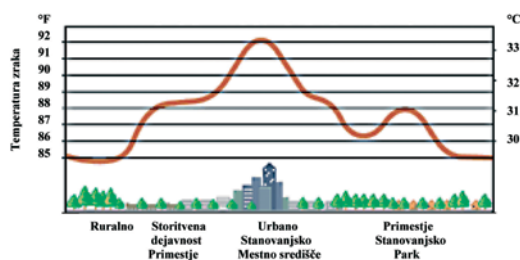
Green building elements have been gaining popularity in the last few years. They constitute passive technologies that we employ to solve problems of modern cities, thereby contributing to the sustainable development of the urban environment. The thermal efficiency of green building elements depends on the climatic characteristics of the location, relative quantity of vegetation in the building, and on urban environment geometry. The air temperature in the urban environment falls most in buildings with a green envelope in a warmer climate sited in a narrow urban canyon. In cooler climates, green building elements improve the occupants' thermal comfort. A comparison with a roof cooled by white reflective paint shows that green rooftops have a better thermal impact due to evapotranspiration. In the case of a rooftop with extensive vegetation, the dark substrate acts as a powerful heat source causing higher surface and air temperatures than a classic concrete roof. Green building elements can also be used for passive cooling, allowing for 12%-90% energy savings. The greatest savings are attained in a thermally non-insulated building in the building's upper floors, and in a hot dry climate.

key words

green building elements, urban heat-island, energy uses in building, bioclimatic design

Urbanizacija v šestdesetih in sedemdesetih letih 20. stoletja je povzročila širjenje mest v ruralna področja, povečano rast mestnega prebivalstva in storitvenih dejavnosti ter vplivala na rabo energije v stavbnem sektorju. Pozidava urbanega okolja, spremenjene hidrotermalne lastnosti površin in pomanjkanje vegetacije pa so vplivali na klimo mest in povzročili tako imenovan učinek urbanega toplotnega otoka [Kosareo in Ries, 2007; Hien in sod., 2007]. Nepremišljena raba materialov za urbane površine ter neupoštevanje principov bioklimatskega načrtovanja je še poslabšala situacijo.

"Kamuflažna arhitektura" temelji na racionalizaciji, saj del izgubljenega zemljišča povlečemo čez stavbni ovoj. Med ozelenjene konstrukcijske sklope stavb, ki v zadnjih letih pridobivajo na popularnosti, prištevamo ozelenjene strehe, ozelenjene stene in ozelenjen stavbni ovoj. Predstavljajo pasivne tehnologije, s katerimi rešujemo probleme modernih mest in s tem pripomoremo k trajnostnem razvoju urbanega okolja. Z ozelenjenimi konstrukcijskimi sklopi lahko pripomoremo k reševanju problema urbanega toplotnega otoka in velike rabe energije v stavbah.



Slika 1: Značilen temperaturni profil urbanega toplotnega otoka [EPA, 2011].
Figure 1: Typical urban heat-island profile.

Pregledni znanstveni članek bo na osnovi znanstvenih dognanj preučil prispevek ozelenjenih konstrukcijskih sklopov stavb na reševanje urbanega toplotnega otoka in velike rabe energije v stavbah. Problematika toplotnega otoka in rabe energije v stavbah bo predstavljena z izsledki znanstvenih študij. Definirane bodo možne rešitve zasnovane na procesu bioklimatskega načrtovanja. Končne ugotovitve pa omogočajo načrtovalcem, da izberejo najprimerneje zasnovan konstrukcijski sklop, ki predstavlja pomemben korak k trajnostnemu razvoju urbanega okolja.

Problematika urbanega toplotnega otoka

Pojem urbani toplotni otok je znan že od leta 1810 [Howard, 1818-20] in pomeni zvišanje temperature zraka v urbanem okolju glede na referenčno točko v ruralnem okolju. Zanj je značilen tipičen temperaturni profil, njegov vpliv pa je moč zaslediti na mikro, mezo in makro nivoju (Slika 1) [EPA, 2011; Santamouris in sod., 2007].

Lastnosti	Beton	Asfalt	Zemlja	Rastlinje
Specifična toplotna kapaciteta (MJ/m ³ K)	1,60	2,00	1,15	2,60
Toplotna prevodnost (W/mK)	1,70	1,30	—	—
Difuzivnost vodne pare (10 ⁻⁶ m ² /s)	0,55	1,58	—	—
Razmerje med difuzivnostjo vodne pare in celotno difuzivnostjo (-)	0,20	0,10	—	—
Emisivnost (-)	0,94	0,81	0,94	0,94
Albedo (-)	0,23	0,10	0,23	0,30
Hidraulična prevodnost (10 ⁻⁴ m/s)	—	—	0,01	—
Vodni potencial (cm)	—	—	-49,0	—
Maksimalna volumetrična vsebnost vode (m ³ /m ³)	—	—	0,492	—
Konvekcijski toplotni upor rastline (s/m)	—	—	—	200
Ekstinkcijski koeficient vegetacije (-)	—	—	—	1,4
Spodnji nivo vlage v zemlji, pri kateri se bo pojavila trajna ovenitev rastline (m ³ /m ³)	—	—	—	0,25

Tabela 1: Primerjava hidrotermalnih lastnosti za izbrane materiale [Alexandri in Jones, 2007:4].

Table 1: Comparison of hydrothermal properties for selected materials.

Urbani toplotni otok se pojavi tekom dneva ali noči, zime ali poletja. Njegov učinek pa je najbolj izrazit v jasnih poletnih nočeh, ko vlada brezvetrje [Santamouris in sod., 2001]. Povzročata številne neželene posledice z vplivom na človeško zdravje [Alexandri in Jones, 2007; Kosareo in Ries, 2007; Takebayahi in Moriyama, 2007]. Med poglavitne vzroke za njegov nastanek prištevamo antropogeno povzročene spremembe urbanih površin. Hidrotermalne lastnosti materialov, ki so razširjeni v urbanem okolju, in njihova primerjava z rastlinjem je predstavljena v Tabeli 1.

Na razvoj urbanega toplotnega otoka pa vplivajo tudi številni faktorji. Najpogostejši med njimi so [Oke in sod., 1991]:

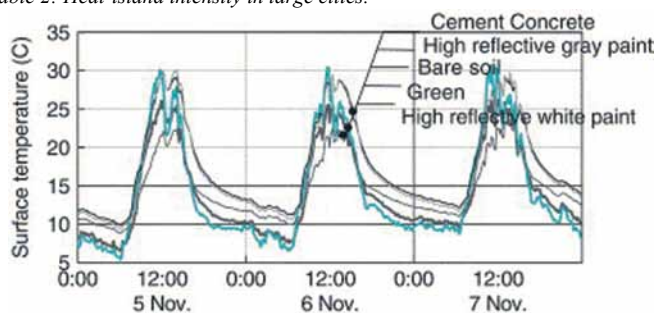
- Geometrija urbanega kanjona, ki vpliva na zmanjšanje izgub dolgovalovnega sevanja v okolico, vključno s sevanjem v vesolje - atmosfero;
- Toplotne lastnosti urbanih materialov, ki povečajo hrambo senzibilne toplote;
- Antropogeni viri toplote, kot so zgorevanje fosilnih goriv, delovanje klimatskih naprav ipd.;
- Učinek tople grede na nivoju mesta, ki se razvije zaradi kopičenja dolgovalovnega sevanja v onesnaženem zraku;
- Geometrija urbanega kanjona, ki vpliva na zmanjšanje efektivnega albeda sistema in povzroči mnogokratno odboj sevanja med površinami znotraj kanjona;
- Zmanjšanje obsega površin za evaporacijo povzroči, da se tvorijo večje količine senzibilne toplote in manj latentne;
- Zmanjšana turbulentni prenos toplote med ulicami.

Intenzivnost toplotnega otoka pomeni maksimalno razliko med temperaturo zraka v središču mesta ter temperaturo zraka v referenčni točki v ruralnem okolju. Odvisna je od toplotne bilance mesta in lahko pomeni tudi 10 °C temperaturne razlike. Po podatkih [IPCC, 1990; Santamouris, 2006; Kajfež-Bogataj, 2005] je intenzivnost toplotnega otoka v večjih mestih od 1,1 °C do 15 °C (Tabela 2).

Mesto	Intenzivnost toplotnega otoka [°C]
30 mest v ZDA	1,1
New York, ZDA	2,9
Moskva, Rusija	3,0 – 3,5
Tokio, Japonska	3,0
Šanghaj, Kitajska	6,5
Atene, Grčija	6,0 – 15,0
London, VB	8
Ljubljana	1,0 – 3,0

Tabela 2: Intenzivnost toplotnega otoka v večjih mestih [IPCC, 1990; Santamouris, 2006; Kajfež-Bogataj, 2005].

Table 2: Heat-island intensity in large cities.



Slika 2: Pojav urbanega toplotnega otoka in predlagane rešitve [Krainer, 2002a:3].

Figure 2: Appearance of heat-island phenomenon in large cities with alternative solution.

Atene so primer urbanega okolja, kjer je učinek toplotnega otoka še posebej izrazit. Maksimalen porast temperature zraka se pojavi v mestnem središču (6 – 15 °C tekom dneva, 2 – 5 °C tekom noči), njegov učinek pa sega tudi v primestje Aten (6 – 2 °C). Pri tem pa je potrebno poudariti, da je temperatura zraka v območju ozelenjenih površin za 2 – 3 °C nižja, kot je v referenčni točki brez ozelenjenih površin [Santamouris, 2006: 98]. Urbano okolje z upoštevanimi principi bioklimatskega načrtovanja, učinkovitim naravnim prezračevanjem in zadostnim deležem ozelenjenih površin predstavlja smer reševanja problema toplotnega otoka.

Raba energije za gretje in hlajenje stavb

Stavbni sektor v svetovnem merilu označuje pravilo 40 %. To pomeni, da gradbena industrija porabi 3 milijone ton gradbenih materialov na leto, kar predstavlja 40 % celotnih svetovnih zalog; v fazi gradnje in uporabe objekta porabijo stavbe 40 % celotne energije; po zaprtem proizvodno-potrošnem krogu pa predstavljajo gradbeni odpadki 40 % svetovnih količin [Kernan, 2001; Gluch, 2005; Kunič, 2007].

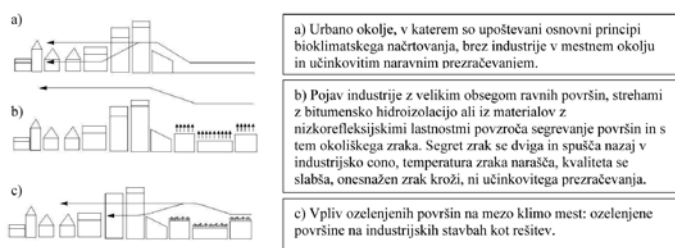
Urbano okolje zajema 2 % zemeljske površine, vendar pa porabi kar 75 % vseh resursov. Vpliv urbanizacije na rabo energije je bil dokazan s številnimi študijami. 1 % povečanje števila urbane populacije povzroči 2,2 % povečanje v rabi energije. 1 % povečanje BDP na prebivalca pa se odraža v skoraj enakem povečanju v rabi energije (1,03 %) [Jones, 1992; Santamouris in sod., 2001]. Statistične analize, izvedene v zahodni in južni Evropi [Stanners in Bourdeau, 1995], so pokazale, da se je delež energije za gretje in hlajenje stavb v zadnjih dveh desetletjih signifikantno povečal. V Atenah, mestu z izrazitim toplotnim otokom, je bilo ugotovljeno, da znaša število ur hlajenja 385, v primestju Aten pa 132 [Santamouris in sod., 2001]. Ojima [1991] pa je ugotovil, da so se v Tokiju, med leti 1965 in 1975, hladilne obremenitve povečale za 10 – 20 %.

Akbari s sod. [1992] je v mestih v ZDA (s populacijo večjo od 100.000) preučeval povezavo med toplotnim otokom in rabo energije. Ugotovil je, da je dvig temperature zraka za 1 °C povzročil povečanje vršnih električnih obremenitev (iz 2,7 % na 3,6 %). Če upoštevamo, da so se v zadnjih štiridesetih letih temperature zraka v US mestih dvignile z 1,1 °C na 2,2 °C, se domneva, da se 3 – 8 % električne energije porabi samo za kompenzacijo toplotnega otoka [Santamouris in sod., 2001]. V Los Angelesu so po letu 1940 ugotovili znatno povečanje maksimalnih temperatur zraka, kar pa se je odrazilo v dodani potrebi po električni energiji (2,7 GW za 1 °C dviga temperature zraka). V ZDA so ocenjeni stroški porabe elektrike v poletnem času znašali 1 milijon \$ na uro (667.913,44 EU) ali več kot 1 bilijon \$ na leto (667.913.438,42 EU) [Akbari in sod., 1992]. Z računalniškimi simulacijami pa je bilo na nivoju celotne države dokazano povečanje vršnih električnih obremenitev za hlajenje, i.s. 0,9 – 5,4 % za 1 °C dviga temperature zraka [Santamouris in sod., 2001].

Mehanizem delovanja ozelenjenih konstrukcijskih sklopov stavb

Mehanizem toplotnih tokov skozi ozelenjene konstrukcijske sklope stavb temelji na fizikalnih zakonih prenosa toplote in snovi skozi zračni sloj, rastlinje, zemljino, gradbene materiale znotraj konstrukcijskega sklopa in mejne razmere [Alexandri in Jones, 2007]. Primerjava med ozelenjenimi in klasičnimi betonskimi strehami na osnovi toplotnih tokov je bila izvedena

s številnimi študijami [Alexandri in Jones, 2008; Takebayashi in Moriyama, 2007; Hien in sod., 2007]. Zaradi poenostavitve je bil preučevan le mehanizem prenosa toplote na nivoju zunanje površine strehe in ne celotnega sklopa.

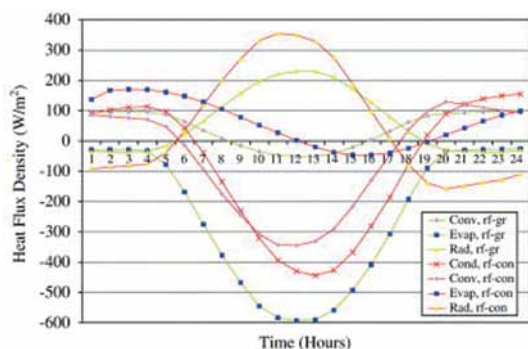


Slika 3: Gostota toplotnega toka (heat flux density, W/m²) s konvekcijo (Conv), evaporacijo (Evap), sevanjem (Rad) in kondukcijo (Cond) na betonski (rf-con) in zeleni strehi (rf-gr), Montreal [Alexandri in Jones, 2008:6].

Figure 3: Convective (Conv), evaporative (Evap), long and short-wave radiative (Rad) and conductive (Cond) heat fluxes on a concrete roof (rf-con) and on a green roof (rf-gr) in Montreal.

Gostote toplotnih tokov s sevanjem, kondukcijo, konvekcijo in evaporacijo na zunanji površini betonske in ozelenjene strehe se razlikujejo med seboj. Gostota toplotnega toka s sevanjem (kratko in dolgovalovno sevanje) je maksimalna pri betonski strehi. To posledično privede do višjih površinskih temperatur. Na ozelenjeni strehi pa se pojavi mnogo večja gostota toplotnega toka s konvekcijo kot v primeru betonske strehe. Največja razlika med ozelenjeno in betonsko streho se pojavi v gostoti toplotnega toka z evaporacijo, kjer deluje ozelenjena streha kot ponor toplote. Gostota toplotnega toka s kondukcijo je minimalna pri ozelenjeni strehi, medtem ko predstavlja pomemben del pri betonski [Alexandri in Jones, 2008; Takebayashi in Moriyama, 2007; Hien in sod., 2007].

Energijska bilanca ozelenjene strehe, tekom dneva in noči je prikazana na sliki 4 [Krainer, 2002]. Podnevi predstavlja sevanje glavni pritek energije skozi konstrukcijski sklop ozelenjene strehe (100 %). Energijski odtoki pa potekajo z evaporacijo in konvekcijo, ki sta tudi enakomerno zastopani (43 %, 47 %). Ponoči pa poteka pritek energije skozi ozelenjeno streho s kondukcijo (75 %), odtoki pa s sevanjem (67 %) in delno z evaporacijo (33 %). Podnevi znaša dotok energije v stavbo 10 %, ponoči pa je odtok energije iz stavbe 25 %.

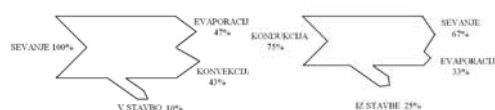


Slika 4: Energijska bilanca konstrukcijskega sklopa ozelenjene strehe (levodan, desnonoč) [Krainer, 2002].

Figure 4: Energy balance for green roof, day/night.

Prednosti in slabosti ozelenjenih konstrukcijskih sklopov stavb študije [Pech in sod., 1999:7; Luley in Bond, 2002; Hien in sod., 2007; Akbari in Konopacki, 2005; Santamouris in sod.,

2001; Alexandri in Jones, 2007 in 2008; Zbašnik-Senegačnik in Kresal 1999; Simonič in Dobrilovič, 2005; Mentens et al, 2006; Getter et al., 2007; GRO, 2011] so dokazale, da ozelenjeni konstrukcijski sklopi stavb prispevajo k trajnostnemu razvoju mest, v katerem so medsebojno uravnoteženi vsi vidiki razvoja: zdravstveni, okoljski, ekonomski in socialni vidik. Ena od pomembnih prednosti ozelenjenih konstrukcijskih sklopov pred klasičnimi pa je tudi daljša življenjska doba in trajnost materialov (predvsem sloja hidroizolacije, v nadaljevanju HI) [Kunič, 2007]. Vegetacija namreč zaščiti nižje ležeče sloje pred zunanji vplivi, kot so toča in veter, temperaturne spremembe in kemični vplivi. Vpliv temperaturnih razlik na HI pri različnih tipih streh je predstavljen v Sliki 6.



Slika 5: Vpliv temperaturnih razlik na sloj hidroizolacije (HI) pri različnih tipih streh (poletje/zima, dan/noč) [Krainer, 2002].

Figure 5: Impact of temperature differences on waterproof membrane during summer and winter period (day/night) for different types of green roofs.

Poleg številnih prednosti, ki sta jih povzela Simonič in Dobrilovič [2005], imajo ozelenjeni konstrukcijski sklopi tudi nekatere slabosti, ki jih je potrebno upoštevati v fazi načrtovanja. Največ pomanjkljivosti imajo strehe z intenzivno ozelenitvijo. Teža zemljine povzroči potrebo po dodatno ojačani nosilni konstrukciji. Sloji, ki podpirajo intenzivno ozelenitev, pa privedejo do višjih začetnih stroškov in dodatnega vzdrževanja [Hien in sod., 2007].

V nadaljevanju bo predstavljena učinkovitost ozelenjenih konstrukcijskih sklopov stavb na zmanjšanje intenzitete urbanega toplotnega otoka in rabe energije v stavbah. Učinkovitost se bo ugotavljala glede na klimatske značilnosti lokacije, delež vegetacije na stavbi, vpliv orientacije in geometrije urbanega okolja. Ozelenjeni konstrukcijski sklopi pa se bodo primerjali tudi z ostalimi alternativami, kot so visokorefleksijski premazi.

Rezultati

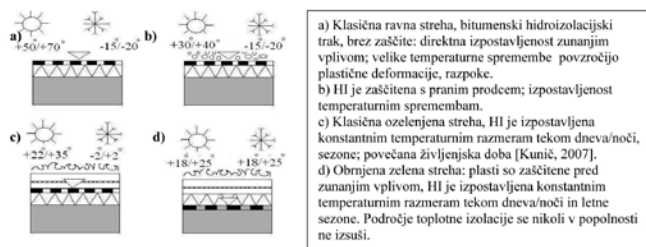
Reševanje problema urbanega toplotnega otoka

Ozelenjeni konstrukcijski sklopi stavb imajo pozitiven vpliv na mikro, mezo in makro klimo mest, prispevajo pa tudi k izboljšanim toplotnim razmeram v notranjosti stavb. Vpliv je lahko neposreden ali posreden. Med neposredne vplive prištevamo znižanje temperature zraka nad nivojem strehe, znižanje temperature zraka v urbanem kanjonu ter znižanje površinskih temperatur na ozelenjenem konstrukcijskem sklopu. Med posredne vplive pa prištevamo znižanje temperatur na neozelenjenih površinah.

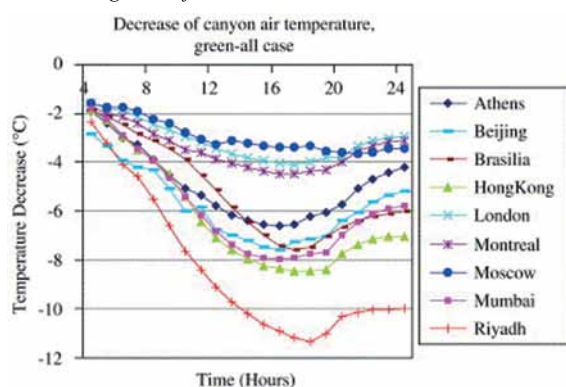
Učinkovitost ozelenjenih konstrukcijskih sklopov glede na lokacijo: "Kje načrtovati ozelenjene konstrukcijske sklope?"

Učinkovitost ozelenjenih konstrukcijskih sklopov je odvisna od klimatskih značilnosti lokacije, deleža vegetacije na stavbi, orientacije in geometrije urbanega kanjona. Študija [Alexandri in Jones, 2008] je glede na klimatske značilnosti lokacije preučevala vpliv ozelenjenih konstrukcijskih sklopov na znižanje temperature zraka in površin v urbanem kanjonu. V analizo je bilo vzetih 9 lokacij z različnimi klimatskimi značilnostmi (London – zmerna klima, Montreal – subarktična klima, Moskva

– kontinentalna klima s hladnim poletjem, Atene – mediteranska klima, Peking – stepa, Riad – puščava, Hong Kong – vlažna subtropska klima, Mumbai – deževni gozd, Brazilija – savana).



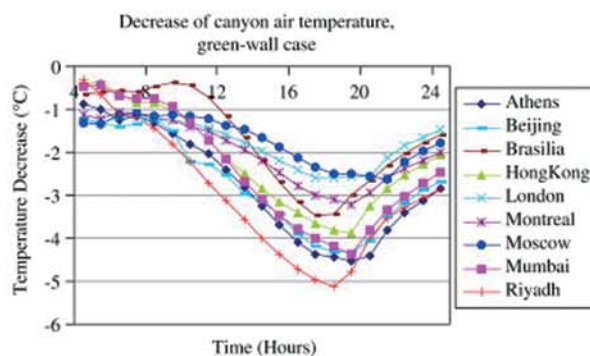
Slika 6: Znižanje temperature zraka v urbanem kanjonu za stavbo z ozelenjenim ovojem, po klimatskih conah [Alexandri in Jones, 2008: 6].
 Figure 6: Temperature decrease in canyon, when both roofs and walls are covered with vegetation for all climates examined.



Slika 7: Znižanje temperature zraka v urbanem kanjonu za stavbo z ozelenjenimi stenami, po klimatskih conah [Alexandri in Jones, 2008: 7].
 Figure 7: Temperature decrease in canyon, when only walls are covered with vegetation for all climates examined.

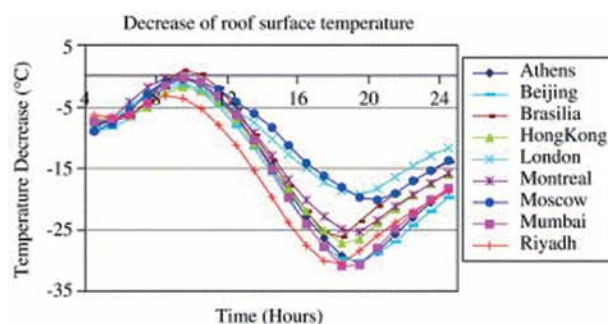
Če primerjamo stavbo z ozelenjenim ovojem ter stavbo z ozelenjenimi stenami, vidimo, da se največje znižanje temperature zraka v urbanem kanjonu pojavi pri stavbi z ozelenjenim ovojem v vroči suhi klimi (Riad-puščava). Največje znižanje temperature zraka znaša 11.3 °C (Riad), najmanjše pa 3.6 °C (Moskva). Pri stavbi z ozelenjenimi stenami pa je znižanje temperature zraka manjše (5.1 °C za Riad, 2.6 °C za Moskvo) (Slika 8). V toplejši in bolj suhi klimi je učinek vegetacije večji. Če spremljamo temperaturo zraka na nivoju strehe (1 m nad streho), vidimo, da se največje znižanje pojavi pri stavbi v vroči suhi klimi, ki ima ozelenjen celoten ovoj (do 26.0 °C, Riad). Znižanje temperature zraka na nivoju strehe pa posledično vpliva tudi na nižjo temperaturo zraka v urbanem kanjonu (11.3 °C, Riad).

Maksimalno znižanje površinske temperature na ozelenjeni strehi se pojavi v vroči suhi klimi (Riad 28 °C) in minimalno v hladnejši klimi (Moskva 18 °C) (Slika 9). Glede na vpliv orientacije pa ugotovimo, da bolj kot je intenzivno vpadno sončno sevanje na ozelenjeno površino, večje je znižanje površinskih temperatur. Tako se v primeru ozelenjenih streh pojavi večje znižanje površinskih temperatur kot na ozelenjenih južnih stenah (Riad 18 °C, Moskva 9 °C). Na nivoju ozelenjene strehe pričnejo temperature zraka in površin padati po 12:00 h, medtem ko v notranjosti kanjona temperature padajo že od jutranjih ur dalje, kar gre pripisati toplotno stabilnejšim razmeram znotraj kanjona.



Slika 8: Temperatura površine ozelenjene strehe, po klimatskih conah [Alexandri in Jones, 2008:7].

Figure 8: Roof surface temperature decrease when covered with vegetation, for all climates examined.



Slika 9: Znižanje temperature asfaltnih površin v primeru stavbe z ozelenjenimi stenami, po klimatskih conah [Alexandri in Jones, 2008: 7].

Figure 9: Asphalt temperature decrease when walls are vegetated in canyon for all nine climates examined.

Evapotranspiracija je proces prehajanja vode v obliki vodne pare z zemeljske površine in skozi listne reže rastlin v ozračje. Učinek evapotranspiracije pomembno prispeva k znižanju temperature ozelenjenih površin in zraka v urbanem kanjonu. To pa posredno povzroči tudi nižjo temperaturo na neozelenjenih površinah, npr. na cestnih in prometnih površinah (maksimalno znižanje 2.0 °C za Riad, minimalno 0.9 °C za Moskvo). Posredni sevalni hladilni učinek dodatno znižuje temperature v urbanem okolju in prispeva k izboljšanju toplotnega udobja v mestih. Glede na omenjeno dejstvo pa je potrebno rabo materialov, ki poslabšajo toplotne razmere v mestih strogo omejiti. Na nivoju stavbnega ovoja je priporočena raba vegetacije.

Študija [Alexandri in Jones, 2008] je v izbranih klimatskih conah spremljala vpliv deleža vegetacije, orientacije in geometrije urbanega kanjona na zmanjšanje temperature zraka znotraj kanjona. V vseh klimah je bilo ugotovljeno, da ima delež vegetacije in geometrija kanjona pomembnejši vpliv na znižanje temperature zraka kot sama orientacija. Pri stavbi z ozelenjeno steno se pojavi samo 0.8 °C razlike med dvema orientacijama. Pri ozelenjenem ovoju pa postane vpliv orientacije na znižanje temperature še manjši (dnevno povprečje 0.2 °C za vse klime). Smer vetra ima še manjši vpliv na znižanje temperature kot orientacija. Za vse geometrije pa velja, da bolj kot je kanjon izpostavljen direktnemu sončnemu sevanju, večje je znižanje temperature (širši kanjon: 9.3 °C; ožji kanjon: 12.3 °C za ozelenjen ovoj).

Glede na študije, ki podpirajo dejstvo, da je učinkovitost ozelenjenih konstrukcijskih sklopov večja v vroči suhi klimi,

se je potrebno vprašati, ali sploh graditi zelene konstrukcijske sklope v hladnejših klimah. Alexandri in Jones [2008] sta ugotovila, da v milem poletju v Moskvi ozelenjevanje stavbnega ovoja ne doprinese toliko k izboljšanju toplotnega udobja zunaj stavbe. Vendar pa ima pozitiven vpliv na toplotno udobno razmere v notranjem okolju. V primeru stavbe z ozelenjeno streho so notranje temperature zraka (brez aktivnega hlajenja) najmanj 3 – 4 °C nižje od zunanjih temperatur, ki znašajo med 25 °C in 30 °C [Liesecke in sod., 1989]. Ozelenjena streha in stene izboljšajo toplotno udobje v notranjem okolju, ne le v vroči klimi, ampak tudi v hladnejših klimah, kjer so ljudje tudi aklimatizirani na nižje temperature.

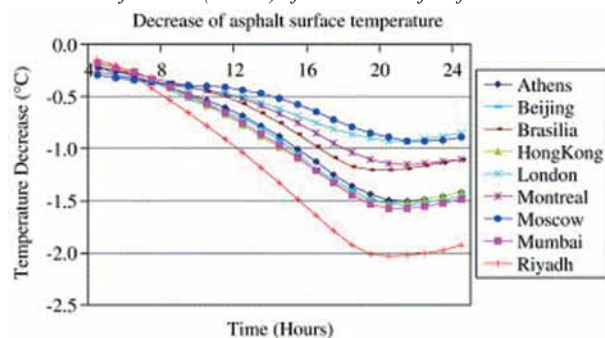
Učinkovitost visokorefleksijskih premazov: "Zelena streha ali visokorefleksijski premaz?"

Študije izvedene s strani Lawrence Berkely National Laboratory dokazujejo, da visokorefleksijski premazi pomembno prispevajo k zmanjšanju intenzivnosti urbanega toplotnega otoka [LBL, 2011]. Njihova izvedba je možna na strehah ter cestnih površinah [Kraimer in sod., 1987; Orel in sod., 1993; LBL, 2011]. Takebayashi in Moriyama [2007] sta primerjala učinek visokorefleksijskih premazov pri ozelenjenih in klasičnih strehah.

Preučevan tip strešne površine	Gola zemlja	Ozelenjena površina	Betonska površina	Visokorefleksijski premaz v sivi barvi	Visokorefleksijski premaz v beli barvi
solarna refleksija []	0,17	0,15	0,37	0,36	0,74

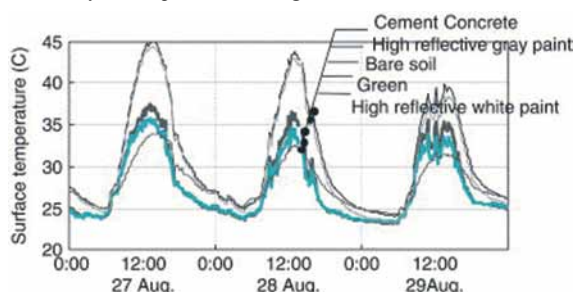
Tabela 3: Solarna refleksija (albedo) za preučevane strešne površine [Takebayashi in Moriyama, 2007:2973].

Table 3: Solar reflectance (Albedo) of examined roof surfaces.



Slika 10: Dnevne spremembe površinskih temperatur na preučevanih površinah (cement concrete-betonska streha, high reflective gray paint-visokorefleksijski siv premaz, bare sole-gola zemlja, green-ozelenjena površina, high reflective white paint-visokorefleksijski bel premaz), avgust 2004 [Takebayashi in Moriyama, 2007:2973].

Figure 10: Surface temperature on August, 2004.

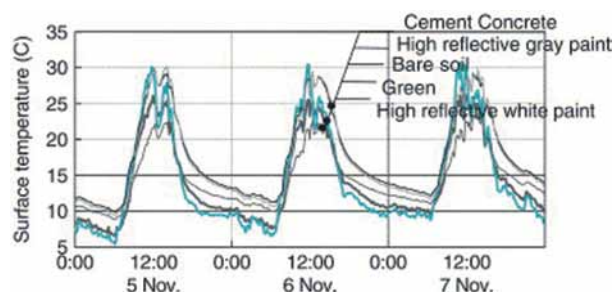


Slika 11: Dnevne spremembe površinskih temperatur na preučevanih površinah (cement concrete-betonska streha, high reflective gray paint-visokorefleksijski siv premaz, bare sole-gola zemlja, green-ozelenjena površina, high reflective white paint-visokorefleksijski bel premaz), novembra 2004 [Takebayashi in Moriyama, 2007: 2973].

Figure 11: Surface temperature on November, 2004.

Takebayashi in Moriyama [2007] sta merila površinske temperature na različnih strešnih površinah. V poletnem času sta ugotovila, da je temperatura na betonski površini in visokorefleksijski sivi barvi približno enaka ali celo 10 °C višja, kot je na ostalih površinah, ki so prekrivane z visokorefleksijskim belim premazom ali so ozelenjene. Temperatura ozelenjene površine pa je zaradi učinka evapotranspiracije nekaj stopinj nižja v primerjavi z golo zemljo in za nekaj stopinj višja kot na visokorefleksijskem premazu bele barve. Novembra pa so površinske temperature na ozelenjeni strehi in goli zemlji približno enake.

Evaporacija se pojavi samo na ozelenjeni strehi in goli zemlji. Njena količina pa je odvisna od vsebnosti vode, ki je večja v globljih plasteh. V zimskem času je količina evaporacije na ozelenjeni strehi manj kot polovična od količine v poletnem času. Podnevi je evaporacija na goli zemlji večja kot na ozelenjeni strehi. Ponoči pa je situacija ravno obratna. V realnosti je ocenjeno, da je tekom noči količina evaporacije zelo majhna, saj se voda pomika iz globljih plasti proti plitkejšim.



Slika 12: Toplotni tokovi na ozelenjeni strehi (net radiation-neto radiacija, sensible heat flux-tok senzibilne toplote, conduction heat flux-toplotni tok s kondukcijo, latent heat flux-tok latentne toplote,) avgust 2004 [Takebayashi in Moriyama, 2007].

Figure 12: Surface heat budget on the green surface on August, 2004.

W/m ²	Ozelenjena površina	Betonska površina	Visokorefleksijski premaz v sivi barvi	Visokorefleksijski premaz v beli barvi
Maksimalen	361	408	399	153
Povprečen	2	72	97	20

Tabela 4: Tok senzibilne toplote na preučevanih površinah (maksimalni, povprečni), avgust 2004 [Takebayashi in Moriyama, 2007:2978].

Table 4: Sensible heat flux on each surface (maximum, average on August, 2004) [Takebayashi and Moriyama, 2007:2978].

Na površini z visokorefleksijskim belim premazom se pojavi manjši toplotni tok s kondukcijo kot na betonski, saj je količina neto pritoka zaradi radiacije majhna. Na površini z visokorefleksijsko sivo barvo pa sta toplotni tok s kondukcijo in tok senzibilne toplote približno enaka kot sta tokova na betonski površini. Neto sevanje je največje na ozelenjeni površini zaradi majhne solarne refleksije. Tok senzibilne toplote pa je na ozelenjeni površini majhen, saj se velik delež absorbirane toplote porabi za evaporacijo (Tabela 4 in Slika 13). Tok senzibilne toplote je tako za 60 W/m² manjši kot na betonski površini, kjer je tudi maksimalen. Razlika se pojavi tudi v nočnem času. Iz rezultatov je moč zaključiti, da so hladne strehe s visokorefleksnimi belimi premazi sicer učinkovite, vendar pa imajo ozelenjene strehe zaradi procesa evapotranspiracije in nižje vrednosti toka senzibilne toplote bistveno boljši toplotni učinek.

Pomanjkljivost študije [Takebayashi in Moriyama, 2007:2978] je v tem, da je analiziran visokorefleksijski premaz z vrednostjo albeda, ki velja za čisto površino. Študija [LBL, 2011] pa je dokazala, da se po vgradnji visokorefleksijskega premaza njegov albedo zelo zmanjša, tudi do 24 %. Po čiščenju se vrednost povrne za

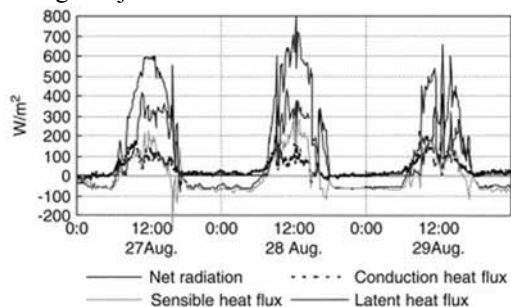
90 %, glede na začetno, kar pa ni stroškovno upravičeno. V eksperimentalnih študijah [Krainer in sod., 1987; Orel in sod., 1993] pa je bil upoštevan tudi faktor umazanije.

Učinkovitost različnih vegetacij

Hien s sod. [2007] je preučeval toplotno učinkovitost različnih tipov vegetacije v Singapurju, kot primeru ozelenjenega mesta. Rezultati meritev na strehi z ekstenzivno ozelenitvijo so pokazali, da se nižje površinske temperature pojavijo po izvedbi ozelenitve. Največja razlika med temperaturami zraka pred in po izvedbi ozelenitve znaša 18 °C. Zanimivo pa je dejstvo, da ima substrat pod ekstenzivno ozelenitvijo celo višjo površinsko temperaturo, kot jo je imel pred izvedbo ozelenitve (izmerjena temperatura substrata je okoli 60 °C). Še več, dosežena temperatura je bila celo višja kot na betonski strehi. Situacija pa se je še poslabšala pri nižji vsebnosti vode v substratu, višjim temperaturam zraka ter večjemu deležu sončnega sevanja. Možni razlogi za višje površinske temperature so temna barva substrata (večji delež absorbiranega sončnega sevanja), suh substrat (manjši hladilni učinek z evaporacijo), redkejša ozelenitev in nižja toplotna kapaciteta substrata. V primeru gostejše vegetacije so temperature substrata relativno nižje [Hien in sod., 2007].

Višje temperature substrata pa imajo tudi pomemben vpliv na temperaturo zraka nad površino strehe. Meritve temperature zraka na različnih višinah (300, 800, 1200 mm) pred in po izvedbi ozelenitve kažejo, da bližje kot smo površini strehe (na 300 mm) višja je temperatura zraka, predvsem po izvedbi ozelenitve. Podnevi deluje substrat kot toplotni vir, evaporacijski učinek pa je šibak. Tako so vršne zunanje temperature nad ozelenjenimi površinami višje kot nad neozelenjenimi in dosežejo tudi 40 °C. Situacija se še poslabša ob nižjih hitrostih zraka. Ponoči pa se pojavi obratna situacija, saj vegetacija deluje kot hladilni vir. Bližje kot smo vegetaciji, nižja je temperatura zraka. Pri tem pa je potrebno poudariti, da se hladilni učinek pojavi le v primeru gostejše ozelenitve. Redkejša ozelenitev in temna barva substrata povzročata višje površinske temperature tudi v nočnem času [Hien in sod., 2007].

Izboljšano učinkovitost ozelenjene strehe se doseže z izvedbo gostejše ozelenitve. Primerjava površinskih temperatur na ozelenjenih strehah, merjeno z IR kamero pokaže, da se nižje površinske temperature pojavljajo na ozelenjeni strehi, ki ima gostejšo vegetacijo.



Slika 13: Površinske temperature merjene z IR kamero na dveh primerih ozelenjenih streh (april 2004) [Hien in sod., 2007:53].

Figure 13: Surface temperatures measured with IR camera for two green roof cases (April, 2004) [Hien et al., 2007:53].

Reševanje problema velike rabe energije v stavbah

Poleg pozitivnega učinka, ki ga imajo ozelenjeni konstrukcijski sklopi stavb na klimo urbanega okolja, jih lahko uporabljamo tudi za pasivno hlajenje. Hladilni učinek ozelenjenih konstrukcijskih sklopov namreč povzroči znižanje temperatur v okolici stavb in vpliva na manjšo rabo energije za hlajenje. Vpliv je odvisen od klimatskih značilnosti lokacije, deleža in pozicije vegetacije na stavbi. Privarčevanje energije je tako od 12 % do 90 % [Santamouris in sod., 2007; Alexandri in Jones, 2007; Spala in sod., 2008] in se pojavi kot rezultat znižanja toplotnih pritokov in izgub skozi ozelenjene dele stavbe. Hien s sod. [2007] je ugotovil, da so se z izvedbo ozelenitve toplotni tokovi skozi streho zmanjšali za več kot 60 %. Če pa je objekt dodatno toplotno izoliran, je odstotek zmanjšanja še večji.

Santamouris s sod. [2007] je izvedel analizo vpliva ozelenitve strehe in izoliranosti stavbe v Atenah na zmanjšanje hladilnih obremenitev. Po izvedbi ozelenitve se hladilne obremenitve v neizolirani stavbi zmanjšajo za 15 – 49 %, v izolirani pa za 6 – 33 %. V primeru hladilnih obremenitev, določenih za zadnje nadstropje, pa je zmanjšanje še večje (v neizolirani stavbi za 27 – 87 %, v izolirani stavbi za 12 – 76 %) [Santamouris in sod., 2007]. Podobne rezultate je dobil tudi Spala s sod. [2008] in sicer je zmanjšanje hladilnih obremenitev na nivoju celotne stavbe med 15 % in 39 %, v zadnjem nadstropju pa doseže 58 % [Spala in sod., 2008].

Glede na izračunano rabo energije za hlajenje stavb je Santamouris s sod. [2007] ugotovil, da je najučinkovitejša izolirana stavba z ozelenjeno streho (31,1 kWh/m²), sledi neizolirana stavba z ozelenjeno streho (32,26 kWh/m²) in izolirana stavba z neozelenjeno streho (34,49 kWh/m²). Najslabši primer predstavlja neizolirana stavba z neozelenjeno streho (40,97 kWh/m²). Zanimivo pa dejstvo, da je raba energije manjša v primeru neizolirane stavbe z ozelenjeno streho kot pa pri izolirani stavbi brez ozelenjene strehe. Vzrok je predvsem v izgubah toplote skozi streho, ki v povprečju znašajo od 20 do 30 %. Ozelenjena streha dodatno pripomore k toplotni izolativnosti in deluje na princip akumulacije z maso. Najslabši primer z vidika rabe energije in toplotnega neudobja pa je primer neizolirane stavbe s klasično streho. Le-to pa se odraža tudi v večji rabi klimatskih naprav (npr. mansardna stanovanja).

Alexandri in Jones [2007] sta izvedla primerjavo še med stavbo z ozelenjenim ovojem in stavbo z ozelenjenimi stenami v različnih klimatskih conah. Ugotovila sta, da je razlika med hladilnimi obremenitvami v stavbi z ozelenjenim ovojem in stavbi z ozelenjeno steno manjša v hladni vlažni klimi (32 – 37 %) in večja v vroči suhi (53 %) [Alexandri in Jones, 2008].

V primeru ogrevalnih obremenitev pa je razlika med ozelenjeno in neozelenjeno stavbo manjša. V realnosti pa je ocenjena mnogo večja razlika [Santamouris in sod., 2007].

Vpliv na makrolokacijo mesta

Ozelenjeni konstrukcijski sklopi stavb imajo pozitiven vpliv tudi v širšem merilu, na nivoju celotnega mesta. Izsledki raziskave o okoljskih prednostih zelenih konstrukcijskih sklopov v Torontu so pokazali, da izvedba ozelenitve na 50 % strešnih površin povzroči znižanje temperature zraka od 0,5 °C do 2°C na nivoju celotnega mesta [CTOCE, 2005; GRPD, 2011]. Vendar pa predstavljajo ozelenjeni deli stavb le majhen korak k celostnemu reševanju. Raziskava na temo reševanja problema toplotnega otoka v New Yorku je pokazala, da ima kombinirana strategija, ki vključuje urbano pogozdovanje, ozelenjene strehe

in ozelenjene površine [NYSERDA, 2006], večji doprinos kot katerakoli individualna strategija. Simulacije so pokazale, da so se temperature zraka po uvedbi kombinirane strategije znižale od 0.1 °C do 0.4 °C [NYSERDA, 2006]. Susca et al. [2011] pa je izvedel meritve toplotnega otoka na štirih izbranih lokacijah New Yorka. Povprečna razlika med temperaturami zraka nad ozelenjenimi in neozelenjenimi deli mesta je znašala 2 °C.

Zaključki

Problemi, s katerimi se srečujejo moderna mesta, se ne rešujejo celostno. Načrtovanje grajenega okolja ne sledi osnovnim principom bioklimatike, na nivoju konstrukcijskih sklopov pa se uporabljajo recepti, ki se jih le prekopira z ene lokacije na drugo. Osnovni princip bioklimatskega načrtovanja je, da izhajamo iz značilnosti lokacije [Krainer, 2002a in 2002b; Kristl in Krainer, 2001 in 2007; Kristl in sod., 2005; Košir in sod., 2010]. Brez upoštevanja bioklimatskega oblikovanja, upoštevanja same lokacije objekta in uporabe dinamičnih računskih modelov ne dosežemo trajnostnih rešitev, pa čeprav izbiramo, v pogledu toplotnih in energetskega karakteristik, še tako dobre materiale, posamezne konstrukcijske sklope ali zasnovo celotnega objekta. Tako mora tudi zasnova ozelenjenih konstrukcijskih sklopov izhajati iz klimatskih značilnosti lokacije, upoštevajoč orientacijo in geometrijo stavbe. Samo s premišljenim izborom ozelenjenega konstrukcijskega sklopa lahko izboljšamo klimo mest in znižamo rabo energije ter s tem pripomoremo k trajnostnemu razvoju urbanega okolja.

Zahvala

Prof.dr. Aleš Krainer, Doc.dr. Živa Kristl, Asist. dr. Mitja Košir, Rudi Perdan; Romana Hudin, Olga Košorok, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente.

Viri in literatura

- Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J., Winnett, S., (1992): Cooling our Communities - A Guidebook on Tree Planting and Light Colored Surfacing. US Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division, Washington, D.C.
- Akbari, H., Konopacki, S., (2005): Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. V: Energy policy, Let. 33, str.: 721-756.
- Alexandri, E., Jones, P., (2007): Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the build environment: Comparison with experimental results. V: Building and Environment, Let. 42, str.: 2835-2849.
- Alexandri, E., Jones P., (2008): Temperature decreases in a urban canyon due to green walls and green roof in diverse climates. V: Building and Environment, Let. 43, št. 4, str.: 480-493.
- CTOCE, City of Toronto and Ontario Centres of Excellence –Earth and Environmental Technologies, Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto 2005. <http://www.toronto.ca/greenroofs/pdf/fullreport103105.pdf>, <dostop junij, 2011>.
- EPA, Environmental Protection Agency, Heat Island Effect, <http://www.epa.gov/hiri/about/index.html>, <dostop junij, 2011>.
- Getter, K., Rowe, D.B., Andresen, J.A., (2007): Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. V: Ecological Engineering, Let. 31, št. 4, str.: 225-231.
- Gluch, P., (2005): Building Green, Perspectives on Environmental Management in Construction. PhD dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- GRPD, Green Roof Project Database, Toronto City Hall Green Roof Demonstration Project. 2000. <http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=59>, <dostop junij, 2011>.
- GRO, Green Roof Organization, The Green roofs for healthy cities, http://www.greenroofs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=26&Itemid=40, <dostop junij, 2011>.
- Hien, N. W., Yok, T. P., Yu, C., (2007): Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. V: Building and Environment, Let. 42, str.: 25-54.
- Howard, L., (1818-20): The climate of London, deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis, 2 vol., London.
- IPPC, International Panel on Climate Change, Working Group II, (1990): Climate Change-The IPCC Impacts assessment. IPPC, Geneva.
- Jones, B. G., (1992): Population growth, urbanization and disaster risk and vulnerability in metropolitan areas: a conceptual framework. V: Environmental Management and Urban Vulnerability, World Bank Discussion Paper: stran 168.
- Kajfež-Bogataj, L., (2005), Climate change impacts on quality of human live. V: Acta agriculturae Slovenica, Let. 85, št. 1, str.: 41-54.
- Kernan, P. (2001): Best Practice Guide, Material Choices for Sustainable Design, Greater Vancouver Regional District. Busby Perkins+Will and Stantec Consulting, Metro Vancouver.
- Kosareo, L., Ries, R., (2007): Comparative environmental life cycle

- assessment of green roofs. V: *Building and Environment*, Let. 42, str.: 2606-2613.
- Košir, M., Krainer, A., Kristl, Ž., (2010): Solar Gains Regulation via Holistically Defined Control System of the Internal Environment. V: *Proceedings Graz ISES*, str.: 1-8.
- Krainer, A., Kladnik, R., Orel, R., Klanjšek-Gunde M. (1987): Thermal Performance of a building with radiative cooling roof. V: *European Conference on Architecture*, Munich, str.: 69-74.
- Krainer, A., (2002a): Viri in pasivni sistemi, Modul 2, Stavba 1. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente, Univerza v Ljubljani.
- Krainer, A., (2002b): High - tech stavba in bioklimatika. V: *Bioklimatske Zgradbe*, Let. 7, str.: 19-22.
- Luley, C. J., Bond, J., (2002): A plan to integrate management of urban trees into air quality planning. Report to. *Northeast State Foresters Association*. NSFA, Waterbury, VT.
- Kristl, Ž., Krainer, A., (2001): Energy evaluation of urban structure and dimensioning of building site using iso-shadow method. V: *Solar Energy*, Let. 70, št. 1, str.: 23-34.
- Kristl, Ž., Zabret, L., Krainer, A., (2005): Karst urban patterns as a function of heating and cooling of buildings. V: *Gradbeni vestnik*, Let. 54, št. 8, str.: 184-189.
- Kristl, Ž., Krainer, A., (2007): Determination of influential area with solar envelope. V: *Gradbeni vestnik*, Let. 56, št. 6, str.: 156-163.
- Kunič, R., (2007): Načrtovanje vrednotenja vpliva pospešenega staranja bitumenskih trakov na konstrukcijske sklope. Doktorska disertacija. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente, Univerza v Ljubljani.
- Liesecke, H-J., Krupka, B., Brueggemann, H., (1989): *Grundlagen der Dachbegruenung Zur Planung, Ausfuehrung und Unterhaltung von Extensivbegruenungen und Einfachen Intensivbegruenungen*. Patzer Verlag, Berlin-Hanover.
- LBL, Lawrence Berkeley National Laboratory, Cool Roofing Materials Database, <http://eetd.lbl.gov/coolroof/> www.nyserda.org/programs/, <dostop junij, 2011>.
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M., (2006): Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? V: *Landscape and Urban Planning*, Let. 77, str.: 217-226.
- NYSERDA, The New York State Energy Research And Development Authority, *Mitigating New York City's Heat Island With Urban Forestry, Living Roofs, And Light Surfaces*, New York City Regional Heat Island Initiative. Final Report 2006, <http://www.nyserda.org/programs/environment/emep/project/>, <dostop junij, 2011>.
- Ojima, T., (1991): Changing Tokyo Metropolitan Area and its Heat Island Model. V: *Energy and Buildings*, Let. 15, št. 1-2, str.: 191-203.
- Oke, T.R., Johnson, G.T., Steyn D.G., Watson, I.D. (1991): Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night part 2: Diagnosis of causation Boundary-Layer Meteorology, Let. 56, str.: 339-358.
- Orel, B., Klanjšek Gunde, M., Krainer, A. (1993). Radiative cooling efficiency of white pigmented paints. V: *Soar Energy*, Let. 50, št. 6, str.: 477-482.
- Peck, S.W., Callaghan, C., Kuhn, M. E., Grass, B., (1999): Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada. Canada Mortgage and Housing Corporation, Canada.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., Assimakopoulos, D.N., (2001): On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. V: *Solar Energy*, Let. 70, št. 3, str.: 201-216.
- Santamouris, M., (2006). Environmental design of urban buildings. An integrated approach. Earthscan, UK.
- Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A., Patargias, P., (2007): Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. V: *Energy*, Let. 32, str.: 1781-1788.
- Spala, A., Bagiorgas, H.S., Assimakopoulos, M.N., Kalavrouziotis, J., Matthopoluis, D., Mihalakakou, G., (2008): On the green roof system. Selection, state of art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. V: *Renewable Energy*, Let 33, št. 1, str.: 173-177.
- Takebayashi, H., Moriyama, M., (2007): Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. V: *Building and Environment*, Let. 42: 2971-2979.
- Simonič, T., Dobrilovič, M., (2005): The role of green roofs and facades in building refurbishment. V: *AR*, Let. 2, str.: 44-49.
- Stanners, D., Bourdeau, P., (1995): *Europe's Environment: the Dobris Assessment*. European Environmental Agency, Copenhagen.
- Susca, T., Gaffin, S.R., Dell'Osso, G.R., (2011): Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. V: *Environmental Pollution*, Let. 159, št. 8-9, str.: 2119-2126.
- Zbašnik-Senegačnik, M., Kresal, J., (1999): Ozelenjene strehe. V: *Gradbeni vestnik*, Let. 48, št. 8/10, str.: 221-226.