

Primljen / Received: 3.3.2015.

Ispravljen / Corrected: 5.6.2015.

Prihvaćen / Accepted: 25.8.2015.

Dostupno online / Available online: 10.3.2016.

Unutarnja okolina renoviranih ureda opremljenih stropnim isijavajućim pločama

Autori:



¹Mag. Sabina Jordan,
dipl. ing. arh.
sabina.jordan@zag.si



¹Dr. Jože Hafner, dipl. ing. stroj.
joze.hafner@zag.si



²Tilmann E. Kuhn, dipl.ing.fiz.
tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de



¹Izv.prof.dr.sc. Andraž Legat,
dipl.ing.fiz.
andraz.legat@zag.si



³Prof.dr.sc. Martina Zbašnik-
Senegačnik, dipl. ing. arh.
martina.zbasnik@fa.uni-lj.si

¹Zavod za gradbeništvo, Slovenija

²Fraunhofer Institute za solarnu energiju

³Sveučilište u Ljubljani, Arhitektonski fakultet

Pregledni rad

Sabina Jordan, Jože Hafner, Tilmann E. Kuhn, Andraž Legat, Martina Zbašnik-Senegačnik

Unutarnja okolina renoviranih ureda opremljenih stropnim isijavajućim pločama

U radu se ocjenjuje unutarnja okolina renoviranih ureda koji su, kao pokusni primjer, opremljeni naprednim stropnim isijavajućim pločama koje se primjenjuju za grijanje i hlađenje. Obavljene su opsežne analize na bazi raznih nizova stvarnih mjerenja kako bi se ocijenila djelotvornost i prikladnost predložene koncepcije za adaptiranje prostora. Ustanovljeno je da čitav sustav za temperiranje uredskih prostora funkcionira na prikladan način, te da raspon unutarnjih temperatura zraka omogućava postizanje najviše razine udobnosti.

Ključne riječi:

analiza, ocjena, koncept adaptacije, stropne isijavajuće ploče, grijanje i hlađenje

Subject review

Sabina Jordan, Jože Hafner, Tilmann E. Kuhn, Andraž Legat, Martina Zbašnik-Senegačnik

Indoor environment in retrofitted offices equipped with radiant ceiling panels

The indoor environment in retrofitted pilot demonstration offices, equipped with advanced radiant ceiling panels that were used for heating and cooling, is evaluated in the paper. Comprehensive analyses based on various sets of real case measurements were carried out in order to assess the efficiency and adequacy of the proposed retrofitting concept. It was established that the entire system for tempering the offices operates well, and that the range of indoor air temperatures ensures the highest level of comfort.

Key words:

analysis, evaluation, retrofitting concept, radiant ceiling panels, heating and cooling

Übersichtsarbeit

Sabina Jordan, Jože Hafner, Tilmann E. Kuhn, Andraž Legat, Martina Zbašnik-Senegačnik

Innenraumklima mit Deckenstrahlplatten ausgestatteter renovierter Büroräume

In dieser Arbeit wird das Innenraumklima renovierter Büroräume bewertet, die als Testbeispiel mit fortschrittlichen Deckenstrahlplatten zur Heizung und Kühlung ausgestattet sind. Ausführliche Analysen wurden basierend auf einer Reihe verschiedener Messungen durchgeführt, um die Effizienz und Eignung des vorgeschlagenen Konzepts bei der Raumadaptation zu beurteilen. Es wurde festgestellt, dass das gesamte System zur Temperierung der Büroräume angemessen funktioniert und der verfügbare Innentemperaturbereich höchstes Komfortniveau ermöglicht.

Schlüsselwörter:

Analyse, Beurteilung, Adaptationskonzept, Deckenstrahlplatten, Heizung und Kühlung

1. Uvod

Realno se može očekivati da će energetska obnova postojećeg građevinskog fonda uskoro postati jedan od glavnih prioriteta u europskom graditeljstvu. Procjenjuje se da se ukupna korisna podna površina prostire na čak 25 milijardi m² (EU27, Švicarska i Norveška) [1]. Osim toga, i zahtjevi kojima trebaju udovoljiti građevine postat će do kraja 2020. mnogo stroži jer će se tražiti da se sve nove građevine odlikuju gotovo nultom potrošnjom energije [2]. Trebat će se provoditi i mjere potrebne za renoviranje postojećih građevina. U okviru tih mjera, svaki građevinski element ili sustav koji bitno utječe na energetska svojstva zgrada trebat će se ili obnoviti ili zamijeniti ako se to tehnički, funkcionalno i ekonomski može provesti. Važno područje provedbe tih mjera je nestambeni sektor u kojem procijenjena prosječna jedinična potrošnja energije iznosi 280kWh/m², što je za barem 40 % više od odgovarajuće potrošnje energije u stambenom sektoru u državama diljem Europe [1].

Poznato je da se učinkovita ušteda energije u građevinama može postići primjenom brižljivo ispitanih "pametnih" koncepcija i mjera. Takve koncepcije uključuju i nove učinkovite tehnologije i rješenja koja se mogu primijeniti na plašt građevine ali i na njenu infrastrukturu, što može bitno pridonijeti postizanju optimalne razine toplinske udobnosti u unutarnjim prostorima. Kada se primjenjuju u postupcima renoviranja građevina, te se tehnologije trebaju prilagoditi tehničkim ograničenjima postojećih građevinskih elemenata i sustava. One isto tako trebaju biti u odgovarajućoj mjeri fleksibilne s obzirom na klimatske promjene. Prema Bonaccijevoj studiji, to bi se više moglo odnositi na promjene temperatura i ekstremne vanjske temperature u nekim vremenskim razdobljima nego na opće linearne trendove srednjeg godišnjeg povećanja temperature zraka [3].

Širokoplošni isijavajući sustavi odnedavno se počinju prihvaćati kao dobra zamjena za grijanje i hlađenje unutarnjih prostora [4, 5]. U okviru ove tehnologije djelotvorno se primjenjuje načelo male temperaturne razlike između širokoplošne isijavajuće površine i okolnog prostora [5]. Sustav se može integrirati bilo u podnu, zidnu ili stropnu konstrukciju kao takozvani toplinski aktivirani sustav zgrade (engl. *thermally activated building system*, TABS), ili se pak može montirati kao dio ovješnog poda ili stropa. Tema toplinske udobnosti i potrošnje energije isijavajućih površina obrađuje se u nekoliko studija prezentiranih u literaturi [4-14]. Te se studije uglavnom temelje na manjim eksperimentima ili numeričkim modelima, a pokrivaju vrlo specifična pitanja o isijavajućim stropnim sustavima. Iako mnoge od njih obuhvaćaju samo područje hlađenja ili grijanja [4-10], u nekim su istraživanjima uključena oba aspekta [11-14].

Ustanovljeno je da se stropne isijavajuće ploče mogu djelotvorno primjenjivati za grijanje i hlađenje zgrada s dobrom toplinskom izolacijom i niskim rashladnim opterećenjem [14]. U usporedbi s tradicionalnim sustavima klimatizacije, ti paneli omogućavaju stvaranje udobnije okoline uz nižu potrošnju energije [13], a

moгу se primjenjivati i u složenim uvjetima upotrebe [11] ako je predviđena i ispravno provedena dobra zaštita od sunca te ako se detaljno razradi primjena mehaničke ventilacije unutarnjeg prostora. Kao što se vidi iz studije koju su objavili Miriel i dr. [14], kada se ne predviđa dodatni tretman zraka u svrhu povećanja konvekcije, tada sustav može samo donekle spriječiti moguću pregrijavanje. Međutim, bolji se rezultati postižu integriranjem odgovarajuće mehaničke ventilacije. Tako se poboljšava prijenos topline konvekcijom isto kao i vremenski odziv isijavajućeg sustava [9]. Istodobno se može smanjiti i veličina isijavajućih površina [9]. Međutim, ključno je pritom odrediti odgovarajući koeficijent prijenosa topline i rashladni kapacitet sustava, naročito u vezi sa solarnim dobicima [5-7]. Osim toga, uz ventilacijski sustav, na djelotvornost stropnih isijavajućih sustava može djelovati i temperatura površina u prostoriji, pa se tako ona treba ocjenjivati zajedno s okolnim unutarnjim prostorom, a ne kao zasebna oprema za grijanje i hlađenje (GVK) [8, 12, 15].

Bez obzira na dobre rezultate, sustavi stropnih isijavajućih panela još uvijek se nedovoljno primjenjuju u praksi. Osim toga, još nije u potpunosti ispitana upotreba i utjecaj ove tehnologije na unutarnji prostor u postupku grijanja. Iskustva koja se stječu u analizi takvih koncepata izuzetno su značajna za prevladavanje sadašnje situacije u kojoj su spoznaje još uvijek nedostatne. Kao korak naprijed prema tom cilju, u glavnom sjedištu Zavoda za gradbeništvo Slovenije (ZAG-a) postavljen je stropni isijavajući sustav u okviru cjelokupne energetske obnove ureda u toj ustanovi. Rad sustava kontinuirano je praćen u razdoblju od godinu dana (tj. od siječnja do prosinca 2013.). Ti takozvani pilot-uredi renovirani su u sklopu šireg demonstracijskog programa koji je prikazan u okviru projekta Europske unije pod nazivom: COST EFFECTIVE (Financijski učinkovita integracija obnovljivih izvora energije u postojeće zgrade, 7FP, 2008-2012).

U ovom su istraživanju primijenjene odgovarajuće eksperimentalne i mjerne metode u svrhu analize rada sustava koji je instaliran u pilot-uredima. Pritom je osnovni cilj bio ocijeniti ponašanje naprednog stropnog isijavajućeg sustava grijanja i hlađenja u obnovljenim uredima, s naglaskom na postizanje toplinske ugone u postupku grijanja. Osim analize temperature unutarnjeg zraka, u radu se prikazuje i analiza potrošnje energije u pilot-uredima. Potrebno je međutim napomenuti da istraživanje obuhvaća samo unutrašnju okolinu ureda. Stoga se u radu ne ocjenjuje oprema za dovod energije, oprema za upravljanje uredima, ukupno korištenje energije, ventilacijski sustav, a također se ne obrađuju ni razne kontrolne strategije.

2. Materijali i metode

2.1. Opis problema: pilot projekt, uredi i njihova obnova

Predmet su ovog istraživanja četiri međusobno spojena ureda koji su dio gornjeg kata ZAG-ove zgrade u Ljubljani,

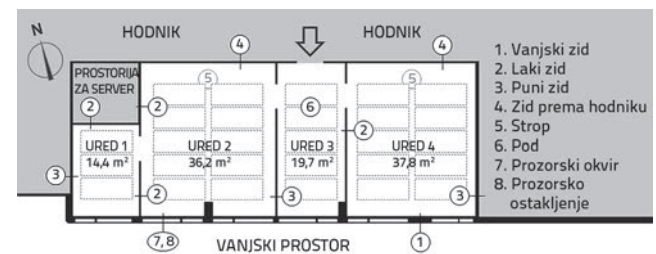
Tablica 1. Površina prozora pilot-ureda

Površine prozora Uredi	Ukupna površina pročelja [m ²]	Ukupna površina prozora [m ²]	Površina fiksnih prozora [m ²]	Površina otvornih prozora [m ²]	Udio prozora u površini pročelja [%]
Ured br. 1	11,1	5,5	4,0	1,5	49,7
Ured br. 2	20,1	10,1	7,1	3,0	50,4
Ured br. 3	10,7	5,2	3,6	1,5	48,3
Ured br. 4	19,7	6,6	4,5	2,2	33,5
Ukupno	61,5	27,4	19,2	8,2	Prosjek 45,5

u Sloveniji (shema ureda prikazana je na slici 1.). Uredi su potpuno renovirani 2012. godine u smislu energetske učinkovitosti, pri čemu je težište stavljeno na predstavljanje inovativnih stropnih isijavajućih panela za grijanje i hlađenje. Mjere obnove obuhvaćale su primjenu postupaka za štednju energije u svrhu poboljšanja energetske učinkovitosti na razini pročelja, uvođenje sustava GVK sa stropnim panelima za grijanje i hlađenje i mehaničkom ventilacijom s rekuperacijom, poboljšanje dopreme energije i električnog sustava te uvođenje sustava za upravljanje zgradama što je uključivalo senzore, mjerne uređaje i ostalu pomoćnu opremu za praćenje.

Neto podna površina pilot-ureda je 108 m², a ukupni neto obujam tih prostora otprilike je 320 m³. Radi se o četiri uredske prostorije smještene na petom katu zgrade, a orijentirane su u smjeru 15° JZ (slika 1.). Ulazni ured je ured broj 3 s površinom od 19,7 m². Nakon njega slijede dva velika ureda, ured broj 2 (36,2 m²) i ured broj 4 (37,8 m²). Najmanji je ured broj 1 kojem ukupna podna površina iznosi 14,4 m². Visina ureda od poda do stropne ploče otprilike je 3,2 m. Zidovi su po sastavu dosta različiti, pa tako imamo žbukane zidove od opeke, lake gipsane

zidove, žbukane betonske zidove i stropnu konstrukciju (slika 1.). Paralelno s pročeljem smještena su dva velika nosiva betonska stupa.



Slika 1. Tlocrt pilot-ureda s crtkano označenim stropnim panelima i osnovnim konstrukcijskim elementima (opisani u tablici 2.)

Analizirane uredske prostorije imaju velike prozore koji u svakom uredu prekrivaju gotovo čitavu širinu pročelja, osim u uredu broju 4 gdje je jedan prozor manji. U svakom je uredu gotovo 70 % ostakljene površine fiksno, a preostali se dijelovi mogu otvoriti (tablica 1.).

Tablica 2. Opis osnovnih elemenata zgrade

Element zgrade	Opis poboljšanih elemenata zgrade	U-vrijednost [W/m ² K]	STARA U-vrijednost [W/m ² K]	
1	Vanjski zid (pročelje)	Betonski zid 20 cm, toplinska izolacija 12 cm	0,28	0,42
2	Laki unutarnji zid	Gips-ploča 2 x 1.25 cm, toplinska izolacija 10 cm	0,34	0,34
3	Puni unutarnji zid	Zid od opeke 12 cm	2,71	2,71
4	Unutarnji zid prema hodniku	Kombinacija zida od opeke 12 cm i iverice	1,31	1,31
5	Strop prema negrijanom potkrovlju	Betonska ploča 20 cm, toplinska izolacija 20 cm	0,18	0,35
6	Unutarnji pod	Betonska ploča 20 cm, toplinska izolacija 2 cm, glazura 7 cm	1,00	1,00
7	Prozorski okvir	Visoko izolacijski aluminijski okvir	1,6	1,9
8	Ostakljenje prozora	Trostruko staklo, plin, niskoemisivni slojevi	0,7	2,0
		Ukupna U-vrijednost [W/m²K]		STARA ukupna U-vrijednost [W/m²K]
Konstrukcijski elementi prema vanjskoj/negrijanoj okolini		0,31		0,60

Uredi su bili u punom pogonu 2013. godine kada je provedena ova analiza. U njima je radilo ukupno sedam osoba i to od ponedjeljka do petka, od osam ujutro do pet poslijepodne. U uredu broj 2 radile su četiri osobe, a u ostalima po jedna osoba. Dodatni dobitak energije postignut je učinkovitim korištenjem računala, ostale informatičke opreme i rasvjete.

2.2. Vanjski omotač zgrade u zoni pilot-ureda

Imajući na umu postojeća ograničenja, poduzete su odgovarajuće mjere da bi se obnovio vanjski omotač te zgrade izgrađene 1982. godine. Prema novoj koncepciji, za omotač u zoni pilot-ureda trebale su se predvidjeti prilično niske U-vrijednosti. Postojeće pročelje poboljšano je dodavanjem dodatne termoizolacije širine 4 cm, pa je tako ukupna širina termoizolacijskog sloja povećana na 12 cm. S obzirom na to da je potkrovlje iznad pilot-ureda bilo negrijano, toplinska izolacija betonske stropne ploče povećana je s postojećih 10 cm za dodatnih 10 cm. Dotadašnji dvostruko ostakljeni prozori zamijenjeni su novim prozorskim okvirima visoke učinkovitosti i trostrukim ostakljenjem U-vrijednosti 0,70 W/m²K i g-vrijednosti 0,29. Opis toplinskih karakteristika novih elemenata vanjskog omotača zgrade prikazan je u tablici 2.

U većem dijelu ljeta izbočeni krov iznad pročelja poslužio je kao fiksna zaštita prozora od sunca. Bez obzira na to, instalirane su nove vanjske ručno podesive žaluzine na motorni pogon da bi se ulazak sunčanih zraka mogao djelotvorno kontrolirati tijekom čitave godine. Korisnici ureda koristili su te žaluzine prilično često. Prema našoj procjeni, vrijednost b iznosila je 0,80 u ljetnim uvjetima. S unutrašnje strane prozora montirane su platnene rolete na ručno upravljanje da bi se korisnici zaštitili od pretjeranog blještanja sunčanih zraka.

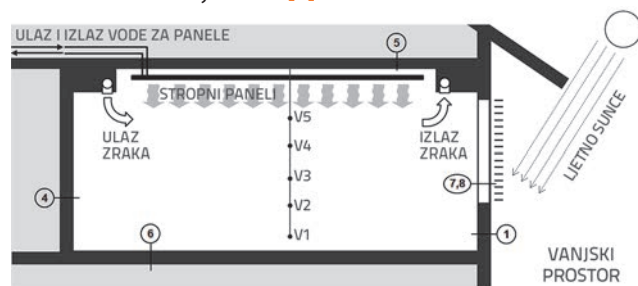
Posebna pozornost usredotočena je na poboljšanje obodnih dijelova pilot-ureda smanjivanjem stope izmjene zraka. Nakon dovršetka adaptacije, stopa izmjene unutarnjeg/vanjskog zraka izmjerena je primjenom standardnog mjernog postupka [16] pri razlikama tlaka od 50 Pa. Izmjerena vrijednost od 1,6 h⁻¹ u skladu je sa zahtjevima koji su propisani u slovenskoj regulativi, prema kojima se traži 2,0 h⁻¹ ili manje za zgrade s mehaničkom ventilacijom te sa stopom izmjene zraka većom od 0,7 [17, 18]. Može se dakle ustvrditi da je izmjerena stopa izmjene zraka vrlo dobra, uzimajući u obzir činjenicu da su pilot-uredi obnovljeni a ne novoizgrađeni prostori.

2.3. Sustav grijanja, hlađenja, ventilacije i klimatizacije (GVK sustav) te kontrolni sustavi pilot-ureda

Da bi se postigla ugodna temperatura unutarnjeg zraka od približno 22 °C, pilot-uredi opremljeni su vodom ispunjenim stropnim pločama za grijanje i hlađenje unutarnjeg prostora. Podrška tom sustavu je bila i mehanička ventilacija, s ulazima i izlazima u blizini stropa (slika 2.).

Ta pozicija u blizini stropa odabrana je zato jer je dokazano da je u slučaju potisne ventilacije i rashladnih stropova utjecaj

temperature na površini stropa na razinu miješanja i veličinu temperaturnog gradijenta od sekundarnog značenja kada su interni dobici srednje visoki [8].



Slika 2. Tipičan presjek kroz glavne elemente zgrade (opisane u tablici 2.) na kojem se vide isijavajuće stropne ploče, ulazi/izlazi zraka kao dijelovi sustava mehaničke ventilacije, te vertikalno postavljene senzori za mjerenje temperature zraka (V1-V5)

Energija potrebna za grijanje i hlađenje stropnih panela u pilot-uredima dobiva se pomoću posebno projektiranog energetskog sustava za prihvata, preradu i pohranjivanje Sunčeve energije (površina termalnih kolektora iznosi otprilike 30 m²). U sustavu se kao medij koristi voda. Toplina se pohranjuje u veliki spremnik (3 m³) koji se koristi izravno za grijanje ureda kada radi u postupku grijanja. U postupku hlađenja toplina se pretvara u hladnoću pomoću adsorpcijskog rashladnika (8 kW nominalne snage hlađenja) i rashladnog tornja nakon čega se pohranjuje u zaseban spremnik (1 m³). Također se koristi i energija prirodnog hlađenja vode noću. Dva tradicionalna pomoćna izvora energije predviđena su za rad sustava u slučaju manjka solarne energije: grijanje iz toplane u postupku grijanja, te primjena kompresorskog rashladnika u postupku hlađenja. Početne radne temperature grijanja i hlađenja određene su na bazi osnovnih geometrijskih i fizikalnih karakteristika pilot-ureda, a to su: rubni uvjeti, toplinsko/rashladno opterećenje, karakteristike toplinskog/rashladnog sustava i dodatnih uređaja, te zahtjevi u pogledu unutarnjeg prostora. Ti potonji zahtjevi temelje se na parametrima kao što su dopušteni stupanj vlage u prostoriji, pretpostavljena razina aktivnosti korisnika prostora, izračunana proizvodnja vlage po osobi te proračunska stopa protoka zraka za ventilaciju po osobi.

Panели su projektirani kao veliki ravni metalni limovi smješteni iznad bakrenih cijevi, a prostiru se na 60 % površine stropne ploče svakog ureda. Cijevi su pričvršćene na stropnu ploču pomoću aluminijskih profila. Svi su stropni isijavajući paneli uvijek radili u istom postupku, tj. u svrhu grijanja ili hlađenja analiziranih prostorija. Proizvodna specifikacija izražena je u W/m² na temelju razlike u temperaturi (linearna funkcija) između prosječne temperature na površini panela i prosječne temperature zraka u prostoriji. Zadana snaga hlađenja iznosila je 80-90 W/m² po 10 K temperaturne razlike, dok je snaga grijanja iznosila 60-70 W/m² po 10 K razlike u temperaturi. U pilot-uredima razlika je u temperaturi iznosila do 7 K u postupku hlađenja, tj. do 14 K u postupku grijanja. Stoga je snaga panela u postupku hlađenja mogla iznositi čak i do 63 W/m², dok je u postupku grijanja mogla dosežati i do 90 W/m².

Kako funkcionira pri relativno niskim temperaturama grijanja u sezoni grijanja, te pri relativno visokim temperaturama hlađenja u sezoni hlađenja, ovaj se sustav smatra izrazito energetski učinkovitim, te može pružiti visoku razinu toplinske ugone. U sezoni grijanja temperatura zraka se u prostorijama namještala na 22 °C (s lokalnim korekcijama od ±2K). Ulazna temperatura vode za stropne panele varirala je od 35 °C do 38 °C u postupku grijanja, dok je izlazna temperatura bila za otprilike 5 K niža. Temperatura zraka u prostorijama bila je namještena na 24-25 °C u sezoni hlađenja (lokalna korekcija od ±2 K na sobnom regulatoru). Hlađenje prostorija provodilo se pomoću hladne vode u rasponu temperatura od 18-20 °C. U postupku hlađenja temperatura se vode u stropnim panelima brižljivo kontrolirala da ne dođe do kondenzacija. To je postignuto automatskom kontrolom podizanja srednje temperature hlađenja čim bi senzori utvrdili određeni stupanj porasta vlage u zraku. Sustav bi se isključio ako se ostavi otvoren prozor (samo u postupku hlađenja). U postupku grijanja, stropni isijavajući sustav radio je bez prekida, s tim da se po noći (tj. od 5 sati poslijepodne do 7 ujutro) temperatura smanjivala za 1 K, a tijekom vikenda za 2K. U postupku hlađenja sustav je stalno radio uz porast temperature tijekom dana ovisno o porastu vanjske temperature (tj. provedena je linearna kompenzacija temperature ovisno o vanjskoj temperaturi). Nešto niža potrošnja energije ostvarena je zbog relativno malog smanjenja temperature tijekom noći i vikendom u postupku grijanja. Postojala je i mogućnost potpunog isključenja sustava noću ili tijekom vikenda i aktiviranja sustava sljedećeg jutra (tj. u ponedjeljak ujutro), ali to ne bi bitno smanjilo potrošnju energije. Istodobno bi takav postupak bitno utjecao na toplinsku ugodu korisnika na početku radnog dana tj. tjedna. Novoinstalirani sustav mehaničke ventilacije dovodio je svjež temperirani zrak u ureda pomoću odgovarajućih kanala i mlaznica. U većim uredima 2 i 4, dva su ulaza smještena blizu pregradnog zida, dok se dva izlaza nalaze blizu zone prozora. U manjim uredima 1 i 3 jedan je ulaz instaliran u blizini pregradnog zida, a jedan izlaz pored zone prozora. Ventilacijom uneseni zrak uvijek je prethodno tretiran u klima-uređaju (sa stopom rekuperacije od 70-80 %) da bi se postigla zadana temperatura i količina vlage. Obujam ventiliranog zraka regulirao se je na ulazima u ventilacijski sustav, tj. na izlazima iz toga sustava. Protok zraka se podešavao prema broju osoba koje su radile u uredima (35 m³/h po osobi), i automatski se definirao uzimajući

u obzir sadržaj CO₂. Temperatura sustava za mehaničku ventilaciju bila je postavljena na 23-24 °C i u sezoni grijanja i u sezoni hlađenja. U prvoj polovici 2013. godine (kada je sustav uveden), sustav mehaničke ventilacije bio je u pogonu samo u radno vrijeme. Nakon što su se korisnici počeli žaliti na kvalitetu zraka, odlučeno je da sustav radi kontinuirano, čak i po noći. Energetski učinkovita rasvjeta postignuta je uvođenjem fluorescentnih lampi s podešavanjem jačine svjetla. Instalirani su ručni prekidači kojima se palilo svjetlo i podešavala jačina rasvjete. U svakoj je prostoriji instaliran sensorima kontroliran sustav za automatsko gašenje svjetla. Za upravljanje sustavom GVK i za automatizaciju prostora korišten je sustav upravljanja zgradama (engl. *Building management system*, BMS). On se koristio za prikupljanje izmjerenih vrijednosti i za davanje naredbi svakom dijelu sustava na bazi izmjerenih vrijednosti i ugrađene logike. Sustav BMS također je omogućavao razmjenu podataka između sustava za prikupljanje podataka, kontrolnog sustava, stanica za automatizaciju i elemenata za automatizaciju procesa u prostorijama.

3. Analiza izmjerenih rezultata

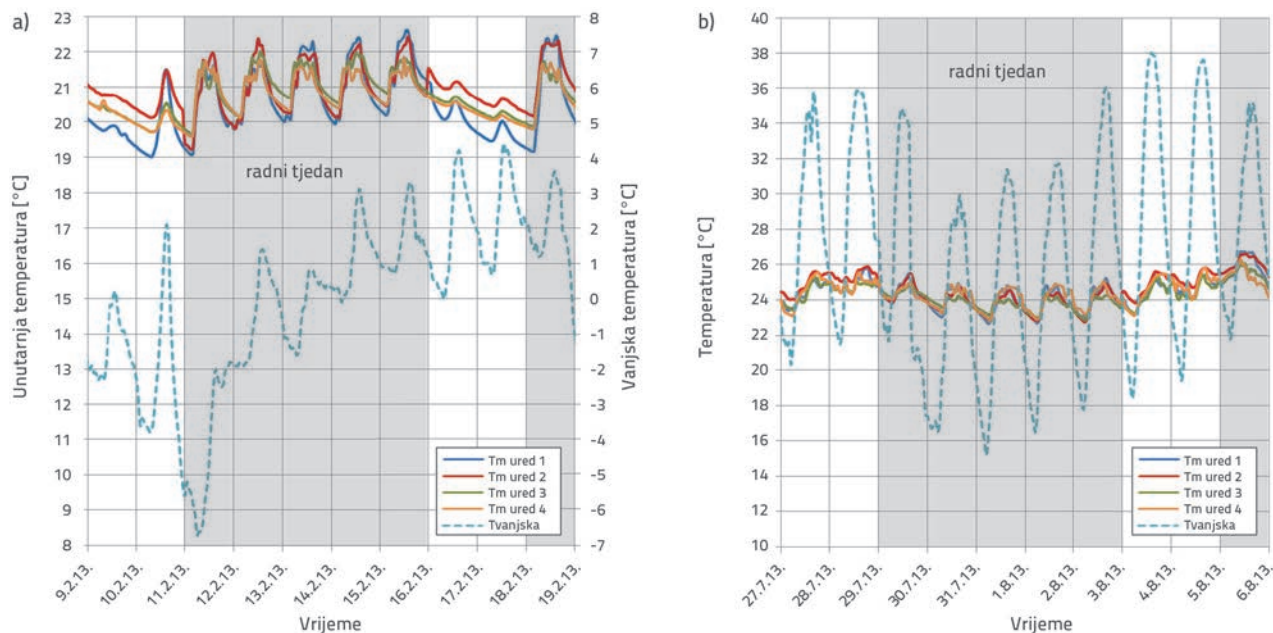
3.1. Oscilacije temperatura unutarnjeg zraka

Regulacija sustava obavljala se pomoću sobnih regulatora postavljenih na unutarnje zidove ureda, a oni su služili za mjerenje sobne temperature. Osim toga, temperature zraka u svakom su uredu bile mjerene na pet vertikalnih razina raspoređenih po čitavoj visini prostorija, a za to je korišteno 5 bimetalnih senzora tipa T. Vertikale sa sensorima nalazile su se na raznim mjestima u pojedinim prostorijama, ali uvijek barem pola metra od zidova, tj. na otprilike 0,25 m (V1), 0,80 m (V2), 1,20 m (V3), 1,80 m (V4) i 2,20 m (V5) od poda (slika 2.). Temperature zraka mjerene su na raznim visinama da bi se odredio raspored temperatura zraka u postupku hlađenja i u postupku grijanja (što uključuje i panele i mehaničku ventilaciju). Posebno se brinulo o oscilacijama temperature zraka i asimetričnom rasporedu temperatura dobivenih isijavanjem.

Srednje temperature unutarnjeg zraka, izračunane na temelju izmjerenih vrijednosti koje su dobivene na vertikalama tijekom reprezentativnih radnih tjedana grijanja i hlađenja, upućuju na veliku učinkovitost sustava, i to unatoč izrazito zimskim tj. ljetnim temperaturama. Niti u jednom od četiri ureda nisu

Tablica 3. Maksimalne oscilacije srednjih unutarnjih temperatura zraka zabilježene na sensorima (V1-V5) na 5 razina

Oscilacije temperatura u pojedinim uredima tijekom grijanja i hlađenja		Ured 1	Ured 2	Ured 3	Ured 4
Od 11. do 16. veljače	maksimalne dnevne oscilacije temperatura [K]	2,5	2,7	2,1	2,2
	maksimalna dnevna temperaturna razlika tijekom radnog vremena [K]	1,1	1,4	0,7	0,7
Od 29. srpnja do 3. kolovoza	maksimalne dnevne oscilacije temperatura [K]	2,3	2,1	1,4	2,0
	maksimalna dnevna temperaturna razlika tijekom radnog vremena [K]	1,7	1,4	0,9	1,7



Slika 3. Srednje satne temperature (Tm) vertikala (V1-V5) u odnosu na vanjsku temperaturu izmjerene za: a) 10 dana u zimi; b) za 10 dana u ljeti

zabilježene velike dnevne oscilacije srednjih temperatura zraka (slika 3.).

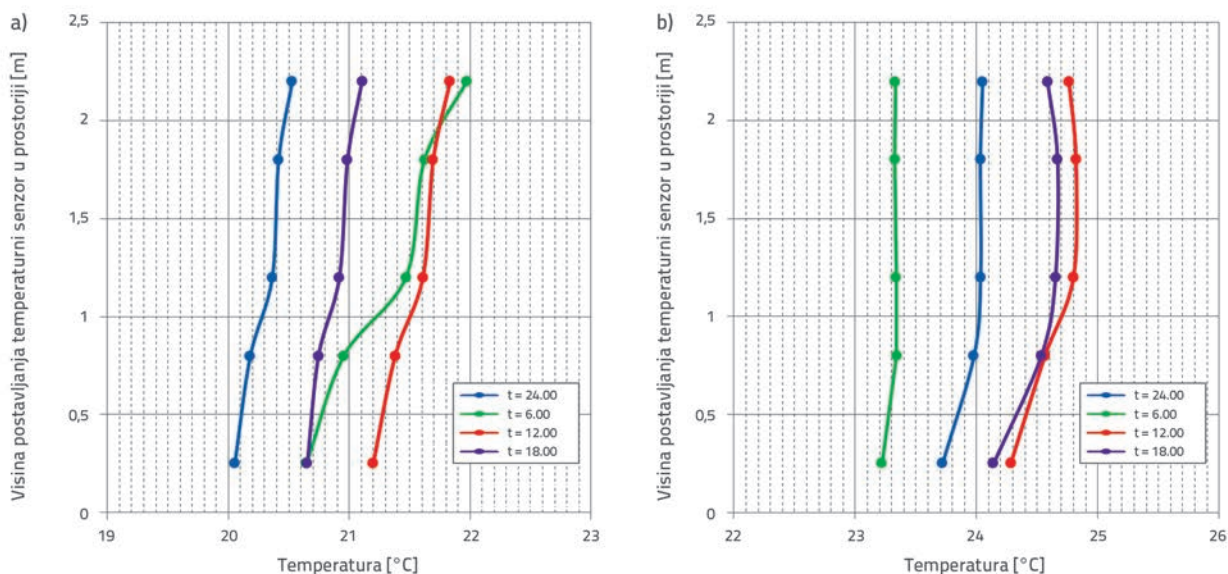
Razmatrano u rasponu od najviših do najnižih vrijednosti, srednje dnevne oscilacije temperatura zraka bile su minimalne. Maksimalne izračunane srednje dnevne oscilacije temperatura zraka u pojedinim uredima prikazane su u tablici 3. za reprezentativne tjedne hlađenja tj. grijanja.

3.2. Razlike vertikalnih unutarnjih temperatura zraka

Izmjerene razlike vertikalnih unutarnjih temperatura zraka varirale su u skladu s vremenom rada cjelokupnog sustava GVK. O vremenu

ovisne temperaturne razlike zabilježene u uredu 4 tijekom tipičnog radnog tjedna s uključenim grijanjem u veljači 2013. godine prikazane su na slici 4.a, dok su tijekom tipičnog radnog tjedna s hlađenjem u srpnju i kolovozu 2013. prikazane na slici 4.b.

U tipičnom radnom tjednu u sezoni grijanja, maksimalna izmjerena vertikalna temperaturna razlika između najviše i najniže pozicioniranog senzora iznosila je u sredini radnog dana (u 12 sati) 1,3 K u uredu br. 2; maksimalna izmjerena vertikalna temperaturna razlika u tipičnom radnom tjednu u sezoni hlađenja iznosila je 0,6 K u uredu br. 1. U prosjeku, temperaturne razlike u analiziranim uredima nikada nisu bile veće od 0,8 K (u sezoni grijanja), tj. 0,3 K (u sezoni hlađenja) (tablica 4.).



Slika 4. Temperature unutarnjeg zraka u presjeku ureda 4 u 6.00, 12.00, 18.00 i 24.00 sata za: a) tipični radni tjedan grijanja; b) tipični radni tjedan hlađenja

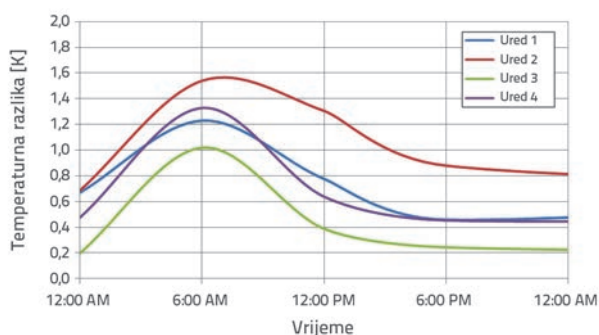
Tablica 4. Unutarnje temperature zraka registrirane u podne na temperaturnim sensorima (V1-V5) na 5 razina

Unutarnje temperature		Razdoblje grijanja: od 11. do 16. veljače				Razdoblje hlađenja: od 29. srpnja do 3. kolovoza			
		Ured 1	Ured 2	Ured 3	Ured 4	Ured 1	Ured 2	Ured 3	Ured 4
Temperatura T [°C] pri:	V5 = 2,20 m	21,33	21,07	21,38	21,20	24,24	24,27	24,09	24,28
	V4 = 1,80 m	21,96	22,06	21,64	21,38	24,52	24,41	24,13	24,56
	V3 = 1,20 m	22,02	22,36	21,69	21,61	24,58	24,39	24,14	24,80
	V2 = 0,80 m	22,16	22,35	21,74	21,70	24,78	24,31	24,12	24,82
	V1 = 0,25 m	22,10	22,38	21,77	21,84	24,83	24,39	24,11	24,76
Maksimalna temperaturna razlika [K]		0,84	1,31	0,39	0,64	0,59	0,14	0,05	0,54
Prosječna temperaturna razlika [K]		0,79				0,33			

Izmjerena razlika u temperaturi zraka između V1 (0,25 m) i V3 (1,20 m) iznad poda u uredima bila je manja od 0,5 K u postupku hlađenja, tj. manja od 1,3 K u postupku grijanja. Prema normi SIST EN ISO 7730, preporučena vrijednost lokalne toplinske ugrade za vertikalnu razliku u temperaturi zraka, mjereno 0,1 m i 1,0 m iznad razine poda (osoba koja sjedi) iznosi < 2 K za najvišu kategoriju tj. kategoriju A [19].

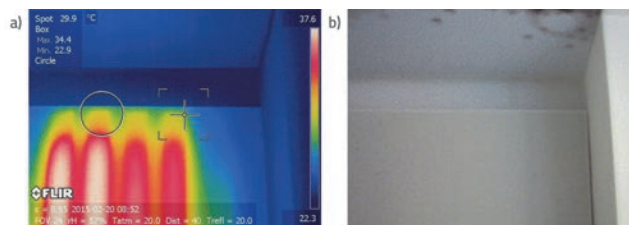
3.3. Asimetrično isijavanje topline u unutarnjem prostoru

Osobe koje koriste prostoriju mogu osjećati neugodu zbog asimetričnog isijavanja topline u unutarnjim prostorima. Poznato je da su ljudi osjetljiviji na asimetrično isijavanje uzrokovano toplim stropom nego hladnim stropom [19]. Osim toga, temperaturne razlike između zadanih temperatura i temperatura ploča bile su mnogo više u uvjetima grijanja nego u slučaju hlađenja. Stoga je u okviru ovog istraživanja ispitan i utjecaj panela korištenih u procesu grijanja. Maksimalne temperaturne razlike između najviše i najniže pozicioniranih senzora, izmjerene tijekom dana u tipičnom radnom tjednu u sezoni grijanja, zabilježene su oko 6 sati ujutro (slika 5.) kada bi sustav grijanja počeo raditi. Sustav se rijetko aktivirao nakon 8 sati ujutro i temperaturne razlike u unutarnjim prostorima su se sve više smanjivale, pa su tako zabilježene poprilično jednolične unutarnje temperature zraka.



Slika 5. Unutarnje temperaturne razlike između najvišeg (V5) i najnižeg (V1) senzora, zabilježene tijekom dana u tipičnom radnom tjednu u sezoni grijanja (AM - prije podne, PM - poslije podne)

Temperature stropa u slučaju korištenja stropnih panela (postupak grijanja) zabilježene su pomoću profesionalne kamere s infracrvenim zračenjem tipa Flir SC640. Termografske slike pokazale su očekivani temperaturni raspon zagrijanih površina panela i betonske ploče (slika 6.). Analiza temperature obavljena je za najgori scenarij: kada paneli rade pri punoj snazi grijanja (ujutro) te pri najvišoj ulaznoj temperaturi vode (38,6 °C). Prosječna temperatura bazirana na izmjenjenim površinskim temperaturama zabilježenima pomoću kamere s infracrvenim zračenjem iznosila je 27,7 °C, a obuhvaćena je čitava površina stropa (60 % panela, 40 % betonske ploče). Mjerenjem temperature poda dobivena je vrijednost od 22 °C, što je dovelo do asimetrije u isijavanju topline na strop za manje od 7 K, a to odgovara kategoriji C prema normi SIST EN ISO 7730 [19].

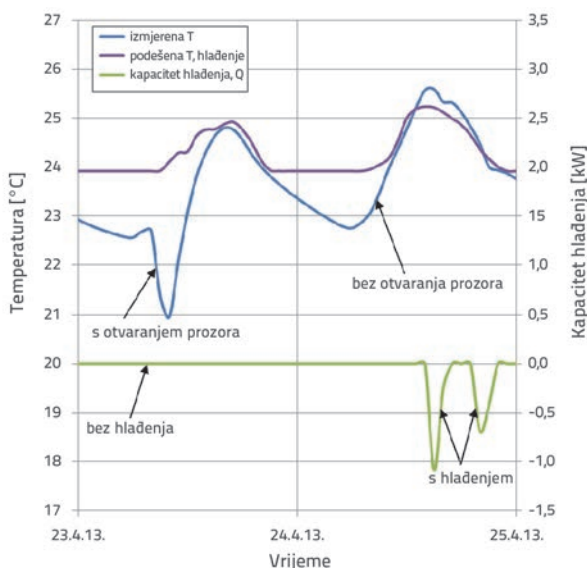


Slika 6. a) Ekran prikazuje termografskog snimanja aktiviranih stropnih panela u postupku grijanja i b) fotografija istog dijela stropa

3.4. Radna učinkovitost stropnih panela

Toplinski odziv sustava za upravljanje stropnim panelima, isto kao i odziv samih panela, bio je jako dobar. Paneli su dobro reagirali na oscilacije temperature zraka i u prostorije su unosili potrebnu toplinu ili hladnoću (ovisno o tome je li korišten sustav grijanja ili hlađenja). Na unutarnju temperaturu zraka može na primjer utjecati otvaranje prozora, dodatni unutarnji dobici uslijed djelovanja uređaja, solarni dobici itd. Na slici 7. daje se primjer odnosa između izmjerene unutarnje temperature zraka (plava linija), unaprijed podešene temperature hlađenja (ljubičasta linija) i kapaciteta hlađenja panela (zeleno linija). Ako ujutro otvore prozor, korisnici mogu povećati razmjenu unutarnjeg i vanjskog zraka te bitno smanjiti temperaturu unutarnjeg zraka.

Na slici 7. vidimo dvije tipične situacije: 23. travnja unutarnja temperatura zraka bila je dovoljno niska (spustila se ispod zadane temperature) pa zato paneli nisu trebali hladiti; 24. travnja prozori nisu bili otvarani pa je unutarnja temperatura zraka bila viša od temperature na koju je bilo podešeno hlađenje, pa je stoga sustav počeo hladiti.



Slika 7. Toplinski odziv sustava stropnih ploča na oscilacije unutarnje temperature zraka zbog otvaranja prozora, zabilježeno tijekom dva dana za vrijeme sezone hlađenja

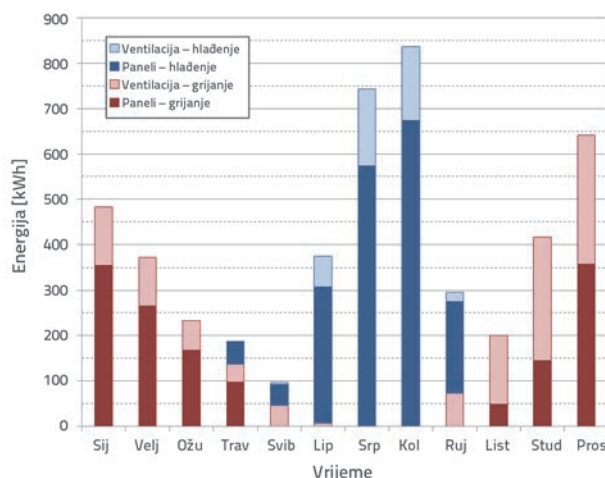
3.5. Potrošnja toplinske i rashladne energije u pilot-uredima

Stropni paneli za grijanje i hlađenje, koji su se nalazili u svakom od analiziranih ureda, bili su opremljeni kalorimetrima za mjerenje energije potrebne za grijanje tj. hlađenje uredskih prostorija. U prostorijama se nalazio i dodatni ventilacijski sustav za temperiranje zraka, pa je i na taj način dobiven dio energije potrebne za urede. Ulazi u sustav i izlazi iz sustava za mehaničku ventilaciju, instalirani u svakoj prostoriji, bili su opremljeni elektronskim regulatorima volumena i temperaturnim sensorima za mjerenje temperature i volumena zraka koji se unosio u prostorije, tj. izbacivao iz prostorija. U 2013. godini ukupna je potrošnja energije za grijanje i hlađenje sva četiri ureda iznosila manje od 4900 kWh/a. Potrošnja analiziranih ureda iskazana po jedinici površine iznosila je 24 kWh/m² za grijanje, tj. 21 kWh/m² za hlađenje. Mjesečna potrošnja energije potrebne za temperiranje uredskih prostorija u 2013. godini prikazana je na slici 8. Kako uredi nisu bili jednaki, tj. razlikovali su se najviše po opremi i namjeni, u nastavku istraživanja mjerena je i potrošnja toplinske i rashladne energije u svakom uredu (slika 9.). Ocjena o tome dobivena je uzimajući u obzir interne dobitke koji su se bazirali na ocjeni zabilježene prisutnosti zaposlenika, njihovog vremena boravka u prostorijama te njihovim aktivnostima

koje su uglavnom bile sjedilačke [19], isto kao i na mjerenjima potrošnje električne energije (tablica 5.).

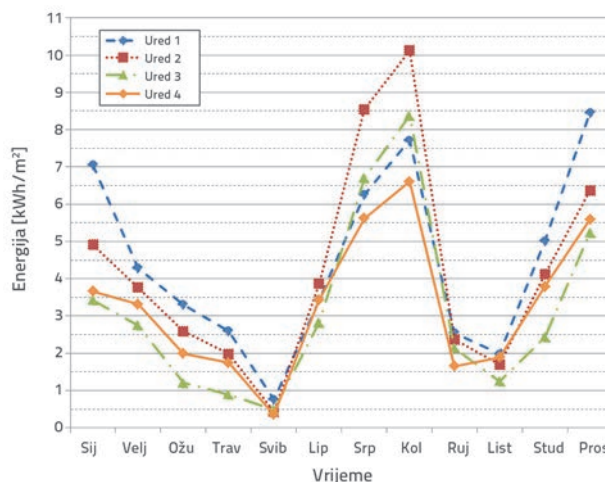
Tablica 5. Interni dobitci po m² pilot-ureda u 2013.

Promatrana razdoblja	Interni dobitci [kWh/m ²]			
	Ured 1	Ured 2	Ured 3	Ured 4
Razdoblje grijanja	20,5	33,5	16,9	18,8
Razdoblje hlađenja	13,2	22,0	10,5	11,5



Slika 8. Energija potrebna za grijanje i hlađenje pilot-ureda u 2013.

Kao što se može zaključiti iz slike 9., najveća potrošnja energije za hlađenje zabilježena je u uredu br. 2, koji isto tako ima i najveće interne dobitke energije. Površina ureda br 4 gotovo je identična površini ureda br. 2 ali su tu interni dobitci mnogo niži pa je, uzimajući u obzir manje prozore (tablica 1.), taj ured imao najnižu potrošnju energije za hlađenje po četvornom metru. Najveća potrošnja energije grijanja po četvornom metru zabilježena je u uredu br. 1, što se objašnjava činjenicom da taj ured ima relativno velike prozore i ugao koji je izložen vanjskim utjecajima (slika 1.).



Slika 9. Mjesečni prikaz potrošnje energije za grijanje i hlađenje ureda u 2013., po jedinici površine

Proračun gubitaka energije grijanja na bazi PRG (probne referentne godine) obavljen je za Ljubljano u vrijeme prvobitnog planiranja obnove ureda. Nakon uključivanja svih planiranih mjera i podataka, izračunani gubici energije iznosili su gotovo 60 kWh/m²a (71 % prijenos, 29 % ventilacijski gubici), a izračunani dobiti energije iznosili su 35 kWh/m²a (35 % solarni a 65 % interni dobiti). Stoga je procijenjeno da ukupna potrošnja energije grijanja nakon obnove iznosi 25 kWh/m²a.

Potrošnja energije nije mjerena prije obnove. Ta je potrošnja izračunana samo za razdoblje grijanja. U uredima se koristila prirodna ventilacija a stupanj zrakopropusnosti nije bio zadovoljavajući. Izmjerena stopa izmjene unutarnjeg i vanjskog zraka iznosila je 13 h⁻¹ pri razlici tlaka od 50 Pa. Stoga su gubici topline uslijed prolaska zraka bili golemi. S obzirom na takvo stanje, izračunana potrošnja energije grijanja u dotadašnjim neobnovljenim uredima iznosila je otprilike 143 kWh/m²a.

4. Zaključak

Obavljena je analiza i opsežno istraživanje u okviru kojih su provedena jednogodišnja mjerenja potrošnje energije u obnovljenim pilot-uredima opremljenima isijavajućim stropnim panelima za grijanje i hlađenje analiziranih prostorija. Ukupan rad sustava je praćen i naknadno analiziran. Analizirane su temperature unutarnjeg zraka u odnosu na energiju generiranu kroz sustav stropnih panela, uz koji je dodatno korišten i ventilacijski sustav.

Učinkovitost stropnih isijavajućih toplinskih i rashladnih panela (podržanih ventilacijom), instaliranih prema koncepciji obnove koja je usvojena za te urede, potvrđena je kroz rezultate analize. Dnevne oscilacije unutarnje temperature zraka u analiziranim prostorijama, isto kao i maksimalne vertikalne temperaturne razlike u postupcima grijanja i hlađenja bile su u skladu s najstrožim zahtjevima udobnosti.

Maksimalne oscilacije temperatura zraka u radnom danu iznosile su 1,4 K u sezoni grijanja, a 1,7 K u sezoni hlađenja. Najviša izmjerena vertikalna temperaturna razlika, određena u podne, iznosila je 1,3 K u tipičnom tjednu grijanja, dok je najveća izmjerena vertikalna temperaturna razlika iznosila 0,6 K u tjednu kada se koristilo hlađenje. Temperaturne razlike dobivene u pilot-uredima koji su opremljeni sa stropnim panelima potvrđuju da su postignuti najbolji rezultati u udovoljavanju lokalnim toplinskim kriterijima za vertikalnu razliku u temperaturi zraka (kategorija A), i to kako za grijanje tako i za hlađenje [19].

Mjerene su i analizirane temperature grijanog stropa jer je ustanovljeno da su korisnici prostora izuzetno osjetljivi na

asimetrično isijavanje koje dolazi primjerice iz toplog stropa. Rezultati mjerenja su pokazali da je u ovom primjeru asimetrija isijavanja iz toplog stropa iznosila manje od 7K. Ta ispitivanja također potvrđuje da načelo širokoplošnog niskotemperaturnog grijanja, primijenjeno u ovim pilot-uredima, daje toplinski ugodnu unutarnju okolinu, bez obzira na činjenicu što se izvor topline nalazi iznad razine glave. Rezultati potvrđuju usklađenost s lokalnim toplinskim kriterijima i za grijanje i za hlađenje: može se očekivati da asimetrija isijavanja odgovara kategoriji C ili višoj [19]. Utvrđeno je da aktivnost korisnika prostora i neki događaji također utječu na rad stropnih panela. S druge strane, izmjerene vrijednosti pokazuju da se isijavajući stropni toplinski i rashladni sustav može u potpunosti, i to brzo i djelotvorno, suočavati s oscilacijama temperature. Međutim, tu je ipak značajna učestalost, intenzitet i trajanje tih događaja. Potrebna su stoga dodatna istraživanja da bi se točnije odredilo koji se utjecaji mogu kompenzirati i gdje su granice analiziranog sustava.

S obzirom na ograničenja mjera korištenih za obnovu analiziranih prostorija, može se ustvrditi da je potrošnja energije za temperiranje pilot-ureda bila vrlo zadovoljavajuća. Sa 24 kWh/m²a potrošnje energije za grijanje te sa 21 kWh/m²a za hlađenje, obnovljeni pilot-uredi svakako ulaze u kategoriju energetski vrlo učinkovitih radnih prostora. Kako širokoplošni stropni sustavi rade prema načelu male temperaturne razlike tijekom grijanja i hlađenja, energija potrebna za temperiranje unutarnjih prostora može se koristiti vrlo učinkovito.

Utemeljeno na eksperimentalnim i mjernim metodama, ovo istraživanje dokazuje da isijavajući stropni paneli bazirani na korištenom konceptu obnove dobro funkcioniraju u klimatskim uvjetima koji prevladavaju u Ljubljani. Potpomognuti ventilacijskim sustavom i dobrom zaštitom od sunca, ti paneli nude izuzetno zadovoljavajuću razinu toplinske ugone. Opsežne analize provedene u sklopu ovog eksperimentalnog rada potvrđuju prikladnost upotrebe isijavajućih stropnih panela i za hlađenje i za grijanje. S jedne strane, ovo istraživanje djelomično podržava opću primjenu prikazane tehničke koncepcije a, s druge strane, autori ipak upozoravaju na potrebu dodatnih provjera u širem spektru klimatskih uvjeta.

Zahvale

Autori zahvaljuju Europskoj komisiji na financijskoj podršci dobivenoj u sklopu projekta Europske unije pod nazivom: COST EFFECTIVE, Financijski učinkovita integracija obnovljivih izvora energije u postojeće zgrade, FP7, 2008-2012, što je pridonijelo realizaciji ovog pilot-projekta u ZAG-ovoj zgradi.

LITERATURA

[1] Europe's Buildings Under the Microscope: a country-by-country review of the energy performance of buildings, The Buildings Performance Institute Europe, BPIE, Brussels, BPIE, October 2011, <http://www.institutebe.com/InstituteBE/media/Library/Resources/Existing%20Building%20Retrofits/Europes-Buildings-Under-the-Microscope-BPIE.pdf>, 10.12.2014.

[2] EPBD Recast: Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (recast), http://www.eceee.org/policy-areas/buildings/EPBD_Recast/EPBD_recast_19May2010.pdf, 15.12.2014.

[3] Bonacci, O.: Analysis of mean annual air temperature series in Croatia, *Građevinar*, 62 (2010) 9, pp. 781-791.

- [4] Andres-Chicote, M., Tejero-Gonzales, A., Velasco-Gomez, E., Rey-Martinez, F.: Experimental study on the cooling capacity of a radiant cooled ceiling system, *Energy and Buildings*, 54 (2012), pp. 207-214, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.043>
- [5] Causone, F., Corgnati, S. P., Filippi, M., Olesen, B. W.: Solar radiation and cooling load calculation for radiant systems definition and evaluation of direct solar load, *Energy and Buildings*, 42 (2010), pp. 305-314, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.008>
- [6] Jeong, J. W., Mumma, S. A.: Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal ceiling radiant panel, *Building and Environment*, 42 (2007), pp. 3176-3185, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.006>
- [7] Fonseca-Diaz, N., Lebrun, J., Philippe, A.: Experimental study and modelling of cooling ceiling systems using steady-state analysis, *International Journal of Refrigeration*, 33 (2010) 4, pp. 793-805, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.12.011>
- [8] Rees, S. J., Haves, P.: An experimental study of air flow and temperature distribution in a room with displacement ventilation and chilled ceiling, *Building and Environment*, 59 (2013) 1, pp. 358-368, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.001>
- [9] Venko, S., Vidal de Ventos, D., Arkar, C., Medved, S.: An experimental study of natural and mixed convection over cooled vertical room wall, *Energy and Buildings*, 68 (2014) 1, pp. 387-395, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.014>
- [10] Rahimi, M., Sabernaemi, A.: Experimental study of radiation and free convection in an enclosure with a radiant ceiling heating system, *Energy and Buildings*, 42 (2010) 11, pp. 2077-2082, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.06.017>
- [11] Fonseca, N.: Experimental analysis and modeling of hydronic radiant ceiling panels using transient-state analysis, *International Journal of Refrigeration*, 34 (2011) 4, pp. 958-967, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.01.007>
- [12] Fonseca, N., Cuevas, C., Lemort, V.: Radiant ceiling systems coupled to its environment part 1: Experimental analysis, *Applied Thermal Engineering*, 30 (2010), pp. 2187-2195, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.05.033>
- [13] Imanari, T., Omori, T., Bogaki, K.: Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system. Comparison with the conventional all-air system, *Energy and Buildings*, 30 (1999), pp. 167-175, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00084-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00084-X)
- [14] Miriel, J., Serres, L., Trombe, A.: Radiant ceiling panel heating-cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumption, *Applied Thermal Engineering*, 22 (2002), pp. 1861-1873, [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00087-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00087-X)
- [15] Fonseca-Diaz, N.: Modelling of a hydronic ceiling system and its environment as energetic auditing tool, *Applied Energy*, 88 (2011), pp. 636-649, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.08.005>
- [16] SIST EN 13829 Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method, SIST, 2001.
- [17] Technical Guideline: TSG-1-004 Efficient use of energy, Ministry of the Environment and Spatial Planning, 2010, http://www.arhiv.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/zakonodaja/prostor/graditev/TSG-01-004_2010.pdf, 03.08.2010.
- [18] Rules on efficient use of energy in buildings PURES 2010, Official Journal of the Republic of Slovenia, 2010. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV10043>, 04.02.2015.
- [19] SIST EN ISO 7730, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, European standard, CEN, 2006.