

Prilog analizi efikasnosti sistema cevnih svetlovoda

*Dragan D. Vučković, Miodrag S. Stojanović i Milica P. Rančić
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Lab. za E.I i O,
18000 Niš, A. Medvedeva 14, Srbija*

dragan.vuckovic@elfak.ni.ac.rs, miodrag.stojanovic@elfak.ni.ac.rs, milica.rancic@elfak.ni.ac.rs

Rezime

U radu su prikazani rezultati eksperimenta sprovedenog na jednom od sistema cevnih svetlovoda koji su prisutni na lokalnom tržištu. Na osnovu merenih rezultata određena je efikasnost sistema, identifikovani su nedostaci i predložene smernice za buduća istraživanja.

1. Uvod

Prema podacima Međunarodne agencije za energiju (International Energy Agency - IEA) na osvetljenje otpada oko 19 % potrošnje električne energije u svetu. Energetski efikasno osvetljenje predstavlja jedan od ključnih faktora za uspešnu energetsku strategiju. Tradicionalni vertikalni prozori mogu da obezbede odgovarajuću dnevnu svetlost do pet metara od prozora, ali kako nivoi osvetljenosti dnevnom svetlošću prilično opadaju sa većom udaljenošću od prozora, količina sunčevog zračenja koja se mora uvesti u prednji deo sobe je disproporcionalna postignutim malim povećanjem nivoa osvetljenosti dnevnom svetlošću u udaljenijem delu sobe. Atrijumi, krovni prozori i krovni monitori mogu doprineti osvetljenju određenih prostora koji su udaljeni od vertikalnih prozora, ali su od male koristi kod osvetljavanja prostora koji se nalaze duboko u unutrašnjosti. Razvoj materijala koji poseduju visoku refleksiju ili visoku refrakciju u poslednjih pedesetak godina omogućio je izradu svetlovoda za sprovođenje dnevne svetlosti duboko u unutrašnjost objekata.

Postoje dve osnovne grupe sistema za sprovođenje dnevne svetlosti. Jedna velika generička grupa sistema ("beam daylighting") preusmerava sunčevu svetlost dodavanjem reflektivnih, ili refrakcionih elemenata na konvencionalne prozore. Druga, najčešće primenjivana grupa sistema su sistemi cevnih svetlovoda (Tubular Daylight Guidance Systems - TDGS) [1, 2]. Ovi sistemi sprovode dnevnu svetlost duboko unutar objekata i kombinuju se sa električnim osvetljenjem, mada se, prema trenutnoj praksi, ova dva sistema uglavnom koriste odvojeno.

Sistemi cevnih svetlovoda razvijeni su pre dvadesetak godina i instalirani su u velikom broju objekata širom sveta. U referenci [2] dat je uvid u veći broj sistema prve generacije cevnih svetlovoda koji su instalirani na realnim objektima.

Pokušaji kombinovanja dnevnog i električnog osvetljenja u zajedničkom prostoru koriste dva pristupa – integrisano osvetljenje i hibridno osvetljenje. Integrisani sistemi koriste zasebne sisteme za distribuciju dnevne svetlosti i sisteme električnog osvetljenja pri čemu su izlazni uređaji (difuzori) bliski a kontrolni sistemi povezani. Hibridni sistemi pokušavaju da istovremeno distribuiraju dnevnu svetlost i svetlost električnih izvora u

unutrašnje prostorije. Pregled razvoja hibridnih svetlosnih sistema prikazan je u [3]. Rezultati eksperimenta sprovedenog na hibridnom sistemu (Solar canopy illuminance system - SCIS) koji je ugrađen na, u tu svrhu izgrađenom, ispitnom postrojenju prikazani su u [4].

U [5] je izvršena analiza investicije/ušteda (cost/benefit) različitih sistema za korišćenje dnevne svetlosti (Tubular daylight guidance systems, Hybrid solar lighting, Parans system i Canopy Illuminance system) u poslovnim objektima. Analize su izvršene za dve lokacije sa različitim nivoima raspoloživosti dnevne svetlosti (London i Valensija kao reprezentivi severne Evrope i Mediterana), pri čemu su sagledana dva nivoa investicija i ušteda. Prvi nivo obuhvata samo investiciona ulaganja, troškove održavanja, uštedu električne energije, uštede u investicijama i održavanju sistema električnog osvetljenja. Drugi nivo osim navedenog obuhvata i cenu neiskorišćenog prostora poda/plafona, uštede za zagrevanje/hlađenje prostorija, ušteda na taksi za očuvanje životne sredine, pozitivan uticaj izlaganja ljudskog tela dnevnoj svetlosti kao i neke druge nepobrojane vrednosti.

U ovom radu prikazani su rezultati istraživanja sprovedenog na jednom od sistema cevni svetlovođa koji su prisutni na lokalnom tržištu. Na osnovu merenih rezultata određena je efikasnost sistema, identifikovani su nedostaci i predložene smernice za buduća istraživanja.

2. Elementi i efikasnost svetlovođa

Sistemi cevni svetlovođa dnevne svetlosti su linearni uređaji koji sprovode dnevnu svetlost u unutrašnjost zgrade. Oni se sastoje od uređaja za prijem prirodne svetlosti, koji se nalazi na spoljašnjem kraju, dela za prenos svetlosti i od dela za distribuciju svetlosti u prostoriji, koji se nalazi na unutrašnjem kraju. Prijemnici (kolektori) mogu biti ili mehanički uređaji koji aktivno fokusiraju i usmeravaju dnevnu svetlost (obično sunčevu svetlost), ili pasivni uređaji koji prihvataju sunčevu svetlost i svetlost iz jednog dela, ili iz cele hemisfere neba. Element prenosa je obično cev obložena materijalom visoke refleksije, ili prizmatičnim materijalom, ili može da sadrži sočiva, ili druge uređaje za preusmeravanje svetlosti. Svetlost se distribuira u unutrašnjost pomoću izlaznih komponenti, obično difuzora napravljenih od opala ili prizmatičnog materijala.

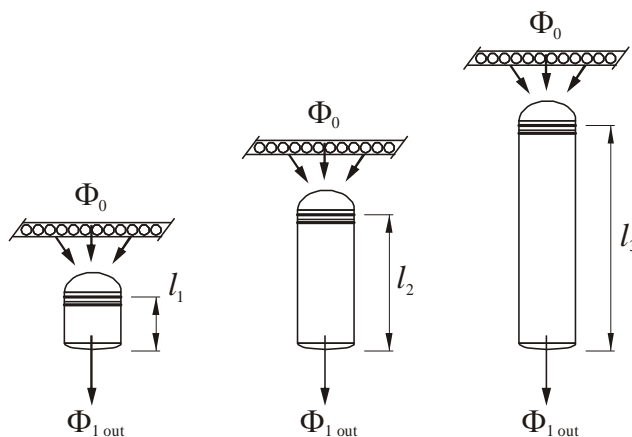
Za dati sistem sa cevni svetlovođom, koji se sastoji od ulaznog prozora za dnevnu svetlost, svetlovođa dužine L , prečnika D i izlaznog prozora za svetlost, "Standardna karakteristika prenosa svetlosti" se određuje prema SIE 173 na sledeći način: difuzan izvor svetlosti se postavlja blizu ulaznog prozora i meri se osvetljenost E na ulaznom prozoru. Svetlosni fluks koji napušta izlazni svetlovod, Φ , se takođe meri. "Standardna karakteristika prenosa dnevne svetlosti" je odnos Φ/E i izražava se u jedinici m^2 . Ovo je površina jednaka otvoru neba koji bi bio potreban da bi se proizvela ista količina svetlosti, ukoliko ne bi bilo gubitka u sistemu. Izvor se sastoji od difuznog materijala koji je osvetljen fluorescentnim cevima i mora da ispuni zahteve za uniformnošću sjajnosti posmatrano sa ulaznog otvora svetlovođa. Preciznije, kada se ulazni ugao posmatra iz bilo koje tačke, za bilo koji pravac do ugla od 70° , koji se odnosi na aksijalni pravac cevi, opažena sjajnost mora biti u okviru $\pm 20\%$ srednje vrednosti. Izlazni fluks, Φ , će se meriti dovoljno velikom integracionom sferom, ili

goniofotometrom. Što se tiče dužine, predloženo je da proizvođači, za merenja, primenjuju standardne odnose dimenzija od 1, 5, 9 i 13 (Slika 1). Interpolacija i ekstrapolacija karakteristika prenosa svetlosti (Slika 2) koje su dobijene na ovaj način će dati prihvatljive aproksimacije za druge dužine. Efikasnost sistema određuje se kao:

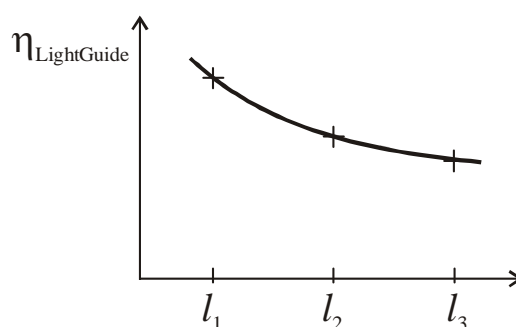
$$\eta_{\text{LightGuide}} = \frac{\Phi_{1\text{out}}}{\Phi_0} \times \frac{1}{\eta_{\text{collector}}}, \quad (1)$$

gde je Φ_0 ulazni svetlosni fluks, $\Phi_{1\text{out}}$ izlazni svetlosni fluks i $\eta_{\text{collector}}$ efikasnost kolektora. Efikasnost $\eta_{\text{collector}}$ određuje se takođe eksperimentalno.

CIE 173 definiše i faktor prodiranja dnevne svetlosti (daylight penetration factor - DPF) kao odnos osvetljenosti okoline određene tačke na datoj ravni zbog svetlosti primljene direktno i indirektno preko svetlovoda iz neba pretpostavljene ili poznate raspodele sjajnosti, i osvetljenosti horizontalne ravni od nezaklonjene hemisfere ovog neba.



Slika 1: Određivanje karakteristike prenosa svetlosti



Slika 2: Karakteristika prenosa svetlosti

2. Eksperimentalni rezultati

Sistem za korišćenje dnevnog svetla proizvođača VELUX ugrađen je na stambenom objektu (WGS84: N 42°58'00.9", E 22°00'50.0"), koji se nalazi u fazi izgradnje. Zbog blizine susednog objekta koji se nalazi sa istočne strane u hodniku je teško obezbediti zadovoljavajući nivo osvetljenosti dnevnom svetlošću primenom

klasičnih prozora, što je naročito izraženo u delu hodnika koje se nalazi u centru objekta.

Sistem se sastoji od krovnog prozora, dve krivine, pravog dela dužine 1,1 metra i difuzora. Međutim, pošto je ugao jedne od krivina veoma mali može se smatrati da je korišćena samo jedna krivina i pravi deo dužine 1.5 m. Na slici 3 prikazan je izgled svetlosnog tunela, dok je na slici 4 prikazan difuzor koji je postavljen na plafonu hodnika. Izgled osnove hodnika i mesto ugradnje difuzora prikazani su na slici 5.

Azimut i altituda normale na krovni prozor iznose 99° i 48° , respektivno. Nefleksibilni tunel ima superreflektujući premaz koji obezbeđuje unutrašnju refleksiju od 98%.

Proizvođač je dostavio sledeće podatke vezano za proračun karakteristike prenosa svetlosti:

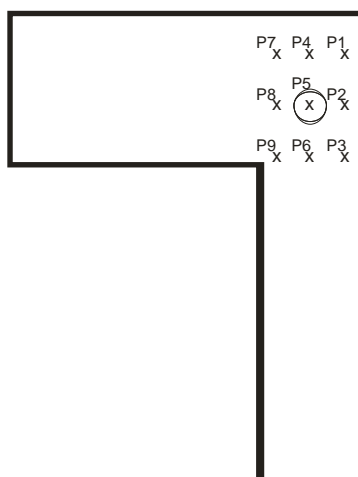
- Smanjenje prenosa svetlosti po m nefleksibilnog tunela = 6%,
- Smanjenje transmisije svetlosti po lakat dodatku = 10%.



Slika 3: Svetlovod.



Slika 4: Difuzor



Slika 5: Izgled hodnika i lokacije mernih tačaka na radnoj ravni

Za pretpostavljenu vrednost ukupne transmitanse čistog kolektora i difuzora:

$$\eta_{\text{collector}} \times \eta_{\text{diffuser}} = 0,9 \times 0,8 = 0,72 \text{ ,}$$

prema podacima koje daje proizvođač, efikasnost celog sistema iznosi:

$$\eta_{\text{system}} = 0,72 \times 0,9 \times 0,94^{1,5} = 0,59 \text{ .}$$

Prema metodu efikasnosti prenosa svetlosti predloženom u CIE 173, a imajući u vidu zbir odnosa dimenzija određen u tabeli 1 dobija se efikasnost sistema $\eta_{\text{system}} = 0,72 \times 0,87 = 0,63$.

Tabela 1. Proračun zbira odnosa dimenzija celog sistema

L_i -M	L_i	M
L_1	1,5	4,29
AA_{30}	0,3	3,5
$\Sigma L_i / \Sigma M$	1,8	7,79

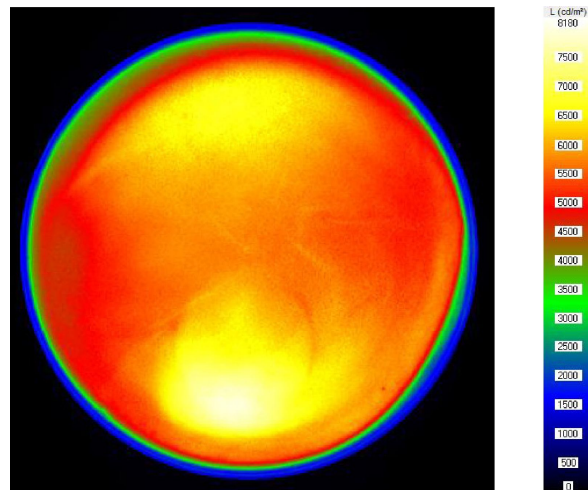
Za merenja obavljena na objektu korišćena je sledeća oprema:

- LMK kamera za merenje sjajnosti,
- Digitalni fotometar LMT S 1000 B sa fotometrijskom glavom SP 30 S0T,
- Luksmetar LMT B510 sa fotometrijskom glavom P 30 SC0.

Da bi se procenila efikasnost primenjenog svetlovoda izvršena su sledeća merenja:

- Osvetljenost na površini prihvatnog sistema (E_{in}),
- Sjajnost difuzora (srednja vrednost $L_{av out}$) u pravcu normalnom na difuzor ,
- Osvetljenost ispod difuzora na visini 0,85 metara od poda.

Na slici 6 prikazan je snimak difuzora napravljen kamerom za merenje sjajnosti u 11.00 časova. Ugao između pravca sunca i vektora normalnog na kolektor u tom trenutku je iznosio 32° . Kao što se može uočiti sa slike korišćeni difuzor ne obezbeđuje zadovoljavajuću uniformnost sjajnosti, zbog čega se izlazni fluks ne može sa zadovoljavajućom tačnošću proračunati na osnovu srednje vrednosti sjajnosti.



Slika 6: Sjajnost difuzora u 11.00 časova

Na slici 7 prikazane su simulacija osvetljenosti objekta i stanje neba u 15.00 časova.



a)

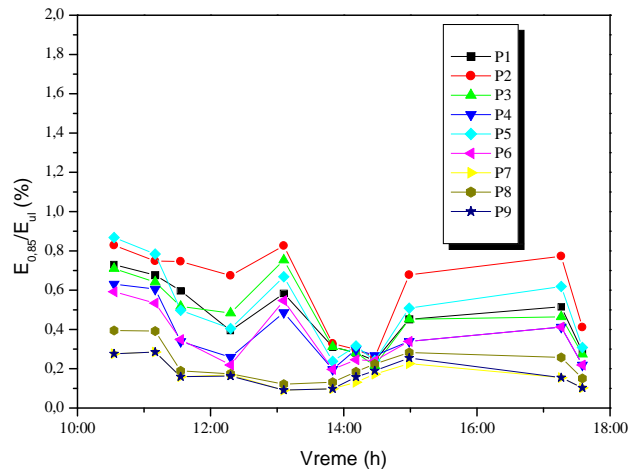


b)

Slika 7: (a) Simulacija osvetljenosti objekta; (b) Stanje neba u 15.00 časova

Tabela 2. Rezultati merenja (18.06.2009)

Time PM	φ (°)	E_{in} (klx)	$L_{av\ out}$ (cd/m ²)	Φ_0 (lm)	$\Phi_{1\ out}$ (lm)	η_{system} (%)
12:00	61,3	75,7	7,590	7,283	2,294	31,5
01:00	85,8	82,3	6,541	7,918	1,977	25,0
02:00	76,4	57,0	5,968	5,484	1,803	32,9
03:00	79,6	40,0	5,019	3,848	1,517	39,4
04:00	89,0	15,3	2,432	1,472	735	49,9
05:00	99,9	9,7	1,849	933	559	59,9



Slika 8: Odnos osvetljenosti u mernim tačkama i osvetljenosti kolektora

U tabeli 2, u kojoj su prikazani su rezultati merenja, φ je ugao između altitude sunca i normale na kolektor, E_{in} osvetljenost na kolektoru, L_{av} srednja vrednost sjajnosti difuzora, Φ_0 - ulazni svetlosni fluks, Φ_{1out} - izlazni fluks i η_{system} efikasnost sistema.

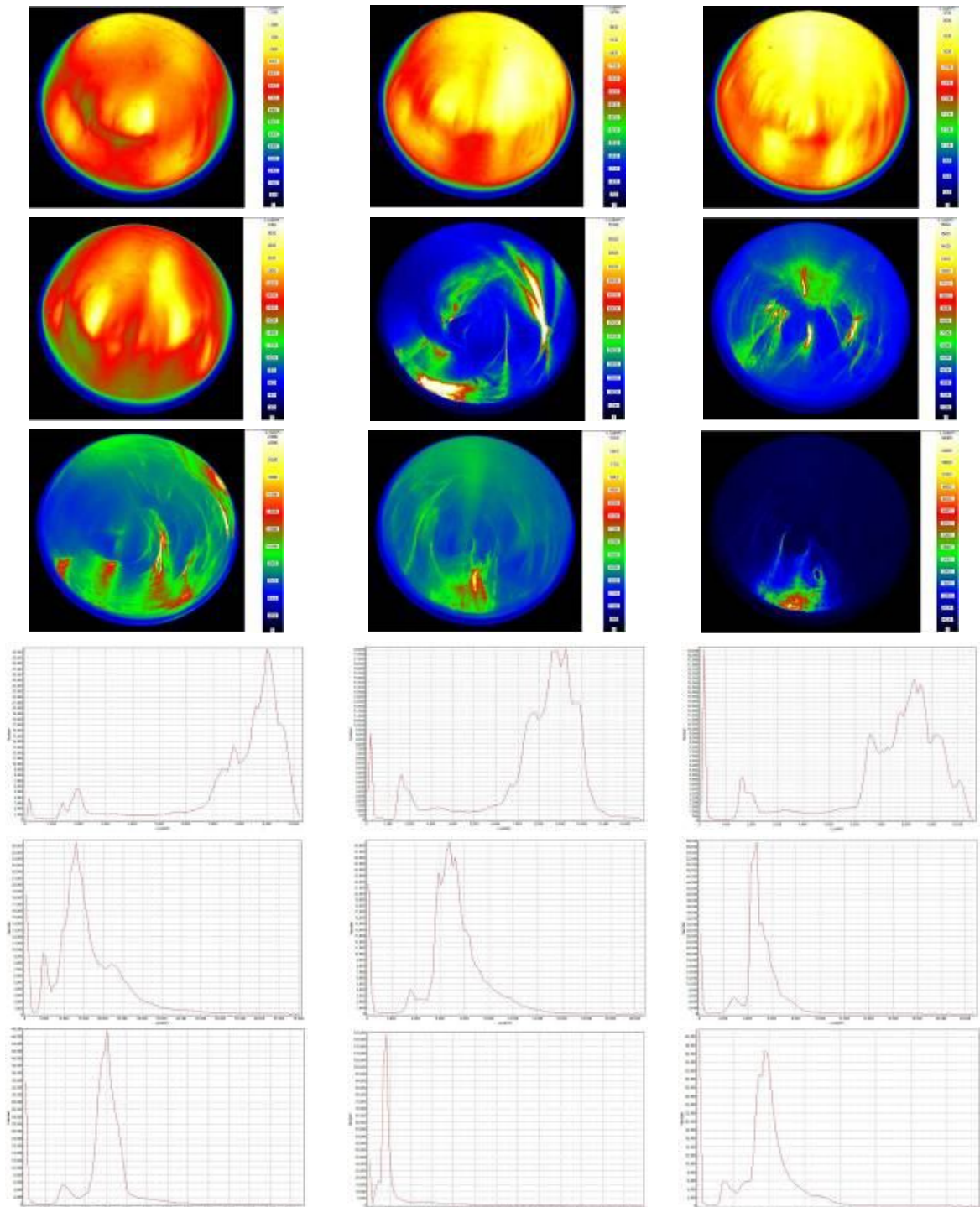
Na osnovu rezultata merenja izvršen je proračun ulaznog i izlaznog fluksa kako bi se procenila efikasnost ugrađenog sistema. Maksimalna zabeležena vrednost osvetljenosti na prihvatnom sistemu iznosila je 100,5 klx dok je najveća osvetljenost na visini 0,85 metara od poda u tački ispod centra difuzora 620 lx. Efikasnost sistema određena je kao odnos procenjenog (izlaznog) fluksa na difuzoru i raspoloživog (ulaznog) fluksa na prihvatnom sistemu.

Efikasnost sistema u najvećoj meri zavisi od položaja sunca, a postoji i određeni uticaj stanja neba (oblačnost). U toku izvođenja eksperimenta efikasnost sistema iznosila je između 25% i 60%. Efikasnost sistema je u načelu veća pri manjem ulaznom fluksu a manja pri većem. Izuzetak od ovog pravila javlja se kada je ugao između normale na površinu prihvatnog sistema i pravca direktne komponente sunca mali. Efikasnost sistema je najmanja kada direktna komponenta pada na prihvatni sistem pod velikim uglom (blizu 90°). U ovakvom slučaju kreće se između 25% i 50%. Kada ne postoji direktno upadanje sunčevih zraka na prihvatni sistem efikasnost sistema je oko 60%. Ova vrednost je jako bliska proračunatoj efikasnosti sistema ($\eta_{system} = 0,59 \div 0,63$).

Na slici 8 je prikazan relativni odnos osvetljenosti u devet odabranih tačaka (slika 5) u hodniku na visini od 0,85 metara od poda i osvetljenosti na prihvatnom sistemu u procentima. Sa slike se najpre može uočiti da se osvetljenost u svim tačkama ne menja na identičan način na osnovu čega se može zaključiti da se difuzor ne ponaša kao idealno difuzan.

Na slici 9 dati su snimci difuzora sa luminansmetrom LMK 98 napravljeni u različitim trenucima sa kojih se uočava da se raspodela sjajnosti po površini difuzora značajno menja sa promenom pozicije sunca i stanja neba. Najveća relativna osvetljenost zabeležena je u tački P2 a ne u tački P5 koja se nalazi direktno ispod centra difuzora. Postoje dva razloga za ovo. Prvi razlog je blizina zida usled čega je izraženija komponenta reflektovana od zida. Sa druge strane sistem ima krivinu u

pravcu tačke P2 što očigledno utiče na osvetljenost u ovoj tački. U tački P5 zabeležena je maksimalna relativna osvetljenost u prepodnevним satima (do 11 h) kada je upadni ugao direktne komponente svetlosti na prihvatni sistem mali. Osvetljenost u tačkama P4 i P6 menja se približno na isti način. S obzirom da je u tački P4 zbog blizine zida izraženiji uticaj reflektovane komponente ali je ovaj uticaj kompenzovan položajem sunca, pošto je direktna komponenta sunca u ovim trenucima dolazila iz pravca tačke P4. Ista logika može se primeniti i kod poređenja osvetljenosti tačaka P1 i P3.



Slika 9: Snimci sjajnosti difuzora u različitim trenucima u toku dana

U periodu kada ne postoji direktna upadna komponenta sunčeve svetlosti na prihvatni sistem relativna osvetljenost se na identičan način menja u svim tačkama. Na kraju treba naglasiti da je osvetljenost čitavog hodnika u periodu kada je postojalo prisustvo dnevne svetlosti bilo dovoljno za kretanje, međutim izražena je neravnomernost osvetljenosti.

Energetski efekat primene pasivnih sistema nije lako kvantifikovati. Kod primene u domaćinstvima ovakvi sistemi mogli bi da se koriste u predsobljima i kupatilima u kojima se primenom klasičnih prozora ne može obezbediti prisustvo dnevne svetlosti. Na ovakvim lokacijama najčešće se koriste klasične sijalice sa užarenim vlaknom prosečne instalisane snage od 100 W. Prema rezultatima istraživanja sprovedenog na teritoriji grada Niša godišnje trajanje uključenosti svetlosnih izvora u predsobljima u kojima nije raspoloživa dnevna svetlost iznosi oko 1800 sati od čega na period dana kada je raspoloživa dnevna svetlost otpada oko 1000 sati. Prema tome godišnja ušteda po jednoj svetiljci iznosi oko 100 kWh.

3. Zaključak

Rezultati merenja izvršenog na realnom stambenom objektu pokazali su da efikasnost sistema svetlovoda procenjena prema CIE 173 u velikoj meri odgovara eksperimentalno određenoj efikasnosti u periodima kada direktna komponenta sunčevog zračenja ne postoji na prihvatnom sistemu. U slučajevima kada je direktna komponenta sunčevog zračenja prisutna na prihvatnom sistemu efikasnost sistema je niža, međutim u ovim slučajevima je svetlosni fluks na izlazu iz svetlovoda značajan. Značajan nedostatak sistema za sprovođenje dnevne svetlosti su velike promene raspoloživog svetlosnog fluksa u toku godine, ali i u toku jednog dana, zbog čega je neophodno njegovo kombinovanje sa veštačkim osvetljenjem. Osim značajnog variranja dobijenog svetlosnog fluksa uočena je i značajna neravnomernost osvetljenosti u prostoriji. Ovaj nedostatak svakako će biti ublažen korišćenjem većeg broja difuzora kao i primenom kvalitetnijih difuzora.

ZAHVALNOST: Ovaj rad je rezultat istraživanja na projektima TR-33035 i TR 33008 koji su finansirani od strane Ministarstva nauke Republike Srbije.

4. Literatura:

- [1] CIE: Tubular daylight guidance systems, CIE 173, 2006
- [2] Marwaee M. A., Carter D.J.: "A field study of tubular daylight guidance installations", Lighting Research and Technology, Vol. 38, 2006, pp. 241-258.
- [3] Mayhoub M.S., Carter D.J.: "Toward hybrid lighting systems: A review", Lighting Research and Technology, Vol. 42, 2010, pp. 51-71.
- [4] Rosemann A., Cox G., Upward A., Friedel P., Mossman M., Whitehead L.: "Efficient dual-function solar/electric light guide to enable cost-effective core daylighting", Leukos, Vol. 3, No. 4, 2007, pp. 259-276.
- [5] Mayhoub M.S., Carter D.J.: "The cost and benefits of using daylight guidance to light office buildings", Building and Environment, Vol. 46, 2011, pp. 698-710.
- [6] FEMP - Federal energy Management program: Hybrid solar lighting illuminates energy savings for government facilities, technology focus, a new technology demonstration publication, DOE/EE-0315, 2007.