

Andrej Đuretić,
Minel-Schröder d.o.o. Beograd

METODOLOGIJA FOTOMETRIJSKIH MERENJA I IZRAČUNAVANJA EFIKASNOSTI LED SVETILJKI

Apstrakt

*Fotometrijska merenja LED svetiljki se mogu sprovesti korišćenjem dve različite fotometrijske metode: apsolutna fotometrija ili relativna fotometrija. Relativna fotometrija, standardno korišćen metod za konvencionalne izvore, dozvoljava kombinaciju zasebnih merenja za izvor svetlosti (sijalicu) i svetiljku. Efikasnost (svetlosna iskoristivost) sijalice se u tom slučaju može pomnožiti sa stepenom iskorišćenja svetiljke (odnos svetlosnog fluksa koji svetiljka izrači i ukupnog fluksa svih izvora svetlosti u njoj) i tako odredi efikasnost svetiljke. Iako ne bez ograničenja, relativna fotometrija je generalno podesna za svetiljke koje koriste lako zamenljive izvore svetlosti sa postojećim karakteristikama i minimalnom interakcijom izvora svetlosti i svetiljke. Suprotno tome, kod sistema u koji su inkorporirani paketi LED čipova postoji značajan uticaj materijala izrade (komponenti) na performanse, što čini neophodnim merenja koja koriste apsolutnu fotometriju i koja se odnose na kompletan proizvod (svetiljku). Udruženje inženjera Severne Amerike koji se bave tehnikom osvetljenja (Illuminating Engineers Society North America - IESNA) je definisalo i izdalo dokument pod nazivom „**IES LM-79-08, Approved method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products**“ koji opisuje tehnike za merenje nekoliko fotometrijskih i električnih veličina LED svetiljki, uključujući ukupni svetlosni fluks, snagu, efikasnost, raspodelu svetlosnog intenziteta i kolorimetrijske karakteristike (temperaturu boje (CCT), indeks reprodukcije boje (CRI) i hromatske koordinate). Ovaj rad daje uvid u pomenuti dokument i analizira različite načine prikazivanja efikasnosti LED svetiljki kao posledice nedostatka jasnih pravila i standarda koji se bave merenjem fluksa “čistog” izvora, a čime se otvara prostor za različita tumačenja.*

1. Osnovne postavke i procedura merenja prema LM-79 metodologiji

Pre nego što se pređe na samu problematiku ovog rada i merenja izlaznog fluksa svetiljki, u nastavku teksta biće predstavljeni najvažniji delovi dokumenta (one koji se tiču mernih postavki, mernih uslova i preporučene merne opreme) i bliže objašnjena metodologija merenja električnih i fotometrijskih veličina kod LED svetiljki [1]. Jasno je navedeno koja poglavlja iz LM-79 dokumenta su tretirana, ali su u nekim slučajevima dodata preciznija objašnjenja, definicije ili slike koje nisu deo ovog dokumenta.

Poglavlje 1.1 – ovaj metod pokriva LED (SSL – Solid State Lighting) proizvode sa inkorporiranom kontrolnom elektronikom i hladnjacima, tj. one uređaje kojima je za rad

jedino potreban priključak na AC mrežno napajanje ili DC napajanje. Dokument se ne bavi uređajima kojima su potrebna spoljna (eksterna) radna kola ili hladnjaci (npr. LED čipovi, LED paketi i LED moduli). Dokument pokriva proizvode u formi svetiljki (uređaja sa uključenim izvorima svetlosti) ili integrisane LED sijalice, tj. ne bavi se proizvodima koji se prodaju bez inkorporiranih izvora svetlosti. Radi lakšeg razumevanja LED terminologije, na slici 1 [2] su prikazani svi standardom definisani tipovi LED uređaja.



Slika 1. Tipovi različitih LED uređaja [2]

Poglavlje 1.2 – ovaj dokument se bavi integrisanim LED (SSL) proizvodima kod kojih se kontroliše (održava konstantnom) struja na nivou PN spoja, pa su zbog toga od značaja i mere se isključivo ulazni električni parametri. Kod LED uređaja napajanih naizmeničnim naponom (ovaj rad ne tretira DC napajanje jer nije od značaja u spoljnom osvetljenju) mere se ulazni efektivni napon, ulazna efektivna struja, ulazna snaga, ulazna frekvencija napona i faktor snage. Fotometrijske veličine koje se mere i koje su od značaja za LED svetiljke su ukupni svetlosni fluks (lm), efikasnost ili svetlosna iskoristivost (lm/W), svetlosni intenzitet (cd) u jednom ili više pravaca, hromatske koordinate, pridružena temperatura boje (CCT) i indeks reprodukcije boje (CRI).

Poglavlje 1.3 – e) pod **stabilizacijom** se podrazumeva rad LED svetiljke u dovoljno dugom vremenskom intervalu neophodnom da merene električne i fotometrijske veličine postanu stabilne. Stabilizacija se ponekad naziva i vreme zagrevanja (warm-up time).

g) pod LED svetiljkom se podrazumeva kompletna LED svetlosna jedinica sastavljena od izvora svetlosti i drajvera zajedno sa drugim komponentama u cilju distribucije svetlosti,

pozicioniranja i zaštite izvora ili povezivanja izvora na napojno električno kolo. LED izvor može biti LED niz čipova (LED array), LED modul ili LED sijalica.

Poglavlje 2.2 – **temperatura ambijenta** na kojoj se vrše merenja mora da se održava na vrednosti $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ izmerenoj u tački udaljenoj ne više od 1m od LED uređaja na istoj visini na kojoj se mereni LED uređaj nalazi. Ako su merenja izvršena na nekoj drugoj temperaturi, ti uslovi se ne mogu smatrati standardnim i to se mora napomenuti u testnom izveštaju.

Poglavlje 3.2 – **efektivna vrednost mrežnog AC napona** ili trenutna vrednost DC napona kojim se napaja testirana LED jedinica **ne sme odstupati više od $\pm 2\%$** od nominalne vrednosti.

Poglavlje 4.0 – LED svetiljke se testiraju **bez perioda stabilizacije** svetlosnog fluksa i drugih radnih karakteristika (tzv. „seasoning“). Naime, poznato je kod nekih LED izvora svetlosni fluks neznatno raste tokom prvih 1000h rada, dok kod drugih to nije slučaj. Imajući u vidu da je, ukoliko se desi, povećanje svetlosnog fluksa manje od nekoliko procenata, takvo odstupanje od inicijalnog svetlosnog fluksa se ne smatra značajnim i ne utiče osetnije na rezultate merenja.

Poglavlje 5.0 – pre nego što se počne sa merenjima, LED svetiljka mora raditi dovoljno dugo da se stabilizuje i postigne temperaturni ekvilibrijum (ravnotežu). Vreme stabilizacije tipično traje od 30 minuta (za male integrisane LED sijalice) do 2 ili više časova (za veće LED svetiljke). Smatra se da je stabilnost postignuta kada su **varijacije (maksimum-minimum) za najmanje 3 poslednja očitavanja svetlosnog fluksa i snage tokom 30 minuta, a sa razmakom od 15 minuta između merenja, manje od 0.5%**. Vreme stabilizacije svakog LED uređaja mora biti dato u testnom izveštaju.

Poglavlje 7.0 – ako je LED svetiljka dimabilna, **merenja treba vršiti u uslovima maksimalne ulazne snage** (radne struje)!

Komentar: za sve ostale vrednosti radnih struja koje nisu usvojene kao nominalne (npr. kod većine proizvođača to je obično 350/500/700/1000 (1050)/1400 mA), radiće se interpolacije korišćenjem različitih matematičkih metoda. Ovo je od izuzetnog značaja i treba imati u vidu da nijedan proizvođač ne daje LM-79 izveštaje za sve moguće radne struje koje se mogu isporučiti LED modulu neke LED svetiljke, već obično samo za tipične vrednosti. Treba samo zamisliti ogroman broj kombinacija ukoliko bi se npr. radila testiranja LED svetiljki za sve struje od npr. 200 mA do 1000 mA sa korakom od 5 mA (dovoljna preciznost) – to bi značilo da bi samo za jednu određenu konfiguraciju LED svetiljke sa određenim brojem LED čipova i određenom optikom trebalo generisati 160 različitih LM-79 izveštaja! To je praktično nemoguće, imajući u vidu da za svaku LED svetiljku postoje veći broj

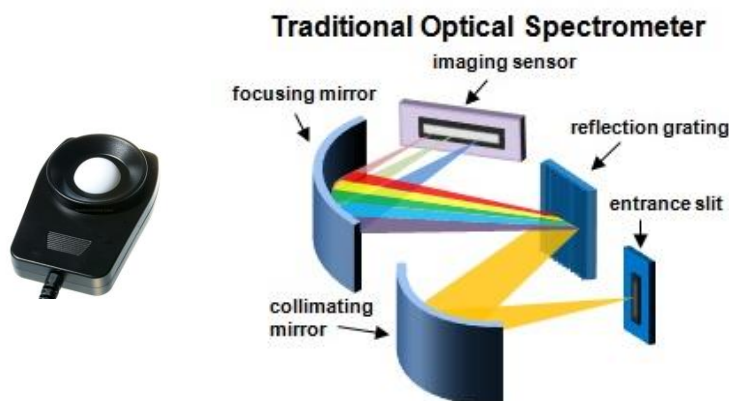
Poglavlje 9.0 – **ukupni svetlosni fluks LED uređaja** (LED modula ili kompletne LED svetiljke) treba meriti sa **integracionom (Ulbrichtovom) sferom** ili **goniofotometrom**.

Izabrani metod će zavistiti od merenih veličina (boja, raspodela svetlosnog intenziteta), veličine testiranog uređaja i nekih drugih zahteva.

Sistem integracione sfere je podesan za merenja ukupnog svetlosnog fluksa i boje svetlosti integriranih LED sijalica ili relativno malih LED svetiljki. Prednost ovog sistema je u brzim merenjima i u tome što ne zahteva mračnu komoru. Kretanje vazduha je svedeno na minimum, a temperatura unutar sfere nije podložna fluktuacijama kao što je to potencijalno slučaj u prostorijama sa kontrolisanom temperaturom. Koriste se dva tipa integracione sfere, jedan sa $V(\lambda)$ spektralno korigovanim fotometrom (fotodetektorom) i drugi sa spektrometrijskim fotometrom koji ima funkciju detektora. Važno je napomenuti da je korišćenjem drugog tipa moguće istovremeno meriti ukupni svetlosni fluks i kolorimetrijske veličine.

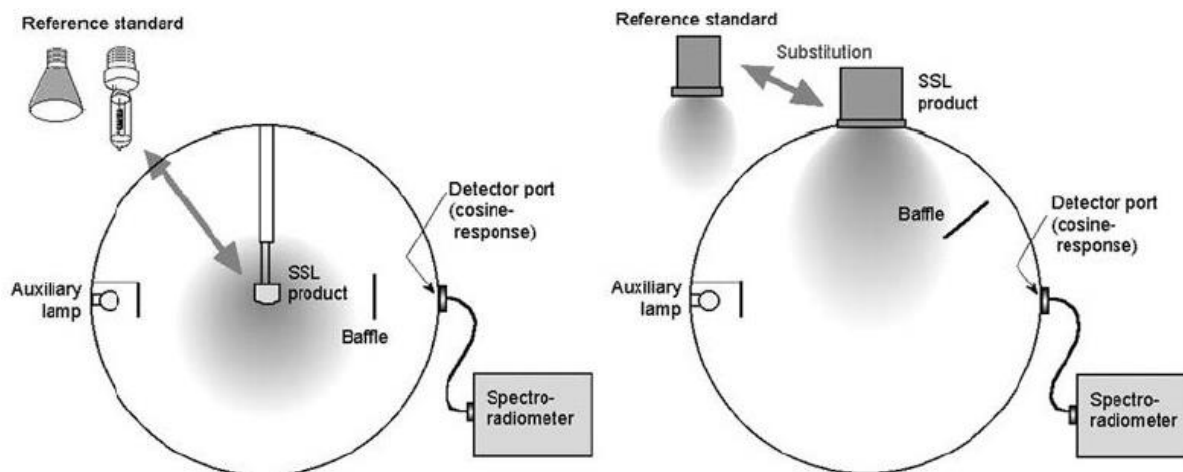
Goniofotometri obezbeđuju merenja raspodele svetlosnog intenziteta, ali i ukupnog svetlosnog fluksa LED svetiljki većih (ali i manjih) dimenzija (u poređenju sa klasičnim fluo svetiljkama). Merenja sa goniofotometrom iziskuju puno više vremena u poređenju sa integracionom sferom.

Poglavlje 9.1 – integraciona sfera sa spektrometrijskim fotometrom (sistem sfera-spektrometrijski fotometar) meri ukupnu emitovanu snagu zračenja za sve talasne dužine („radiant flux“ - jedinica W/nm) iz kojeg se izračunavaju ukupni svetlosni fluks (snaga zračenja za talasne dužine koje pripadaju vidljivom delu spektra) i kolorimetrijske veličine. Korišćenjem **spektrometrijskog fotometra „array“ tipa** (sa nizovima fotosenzora), brzina merenja može biti istog reda veličine kao i sa standardnim fotometrom (slika 2 [3]).



Slika 2. Tipični spektrometrijski fotometar „array“ tipa (sa nizovima fotosenzora) [3]

Poglavlje 9.1.2 – na slici 3 [1] prikazane su preporučene geometrije sfere u sistemu sfera-spektrometrijski fotometar za merenje ukupnog svetlosnog fluksa SSL (LED) uređaja. **4π geometrija** (slika 2a) se preporučuje za sve tipove SSL (LED) uređaja, uključujući one koji emituju svetlost u svim pravcima (4π sr) ili samo u pravcu ispred sebe (u donji poluprostor) bez obzira na orijentaciju (tzv. „forward emission“).



Slika 3. Preporučene geometrije sfere sa spektroradiometrom za merenje ukupnog svetlosnog fluksa. a) 4π geometrija za sve tipove SSL (LED) uređaja, b) 2π geometrija za SSL (LED) uređaje sa usmerenom emisijom [1]

Kod 4π geometrije ukupna površina testiranog uređaja mora biti manja od 2% ukupne površine sfere (npr. sferni objekat prečnika 30 cm u sferi prečnika 2m), a dužina linijskog uređaja (npr. linijske LED svetiljke) mora biti manja od $2/3$ prečnika sfere. Standardni (pomoćni, referentni) izvori za merenje ukupnog svetlosnog fluksa su **halogeni izvori sa kvarcnim cevima** zbog njihovog širokog spektra koji omogućuje kalibraciju spektroradiometra u potpunom vidljivom spektru zračenja. Kao što je već pomenuto u poglavlju 2.2, temperatura ambijenta unutar sfere mora biti u $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ granicama.

Poglavljje 9.1.4 – spektroradiometri sa nizom fotosenzora omogućuju kraće vreme merenja, minimalno u spektralnom opsegu od 380nm do 780nm (CIE međunarodna komisija za osvetljenje u preporuci „CIE S010/E:2004 / ISO 23539 – 2005 (E): Photometry – the CIE system of physical photometry“ definiše spektralni opseg vidljivog zračenja od 380nm do 830nm).

Poglavljje 9.2 – integraciona sfera sa $V(\lambda)$ spektralno korigovanim fotometrom (slika 4 [3,4]) predstavlja tradicionalan fotometrijski metod koji je prihvatljiv, ali ne i preporučen u merenju svetlosnog fluksa SSL (LED) uređaja zbog potencijalno velikih grešaka usled spektralnih neusklađenosti (dobar deo njih se eliminiše zahvaljujući $V(\lambda)$ spektralnoj korekciji), ali i zbog toga što su za merenje kolorimetrijskih veličina potrebni dodatni odvojeni merni instrumenti. Ipak, ovaj merni instrument je i dalje veoma zastupljen u kolorimetrijskim merenjima (hromatske koordinate, CCT, CRI), ali i u fotometrijskim merenjima, pre svega na LED izvorima svetlosti (LED modulima) pre nego što postanu integralni deo LED svetiljki kod kojih se merenja obavljaju drugim mernim instrumentima.



Slika 4. Integraciona (Ulbrichtova) sfera [3,4]

Takođe, i kod integracione sfere sa $V(\lambda)$ spektralno korigovanim fotometrom je preporučena 4π geometrija, a jedina razlika u odnosu na sliku 2 je što je kao detektor korišćen fotometar, a ne spektrometar.

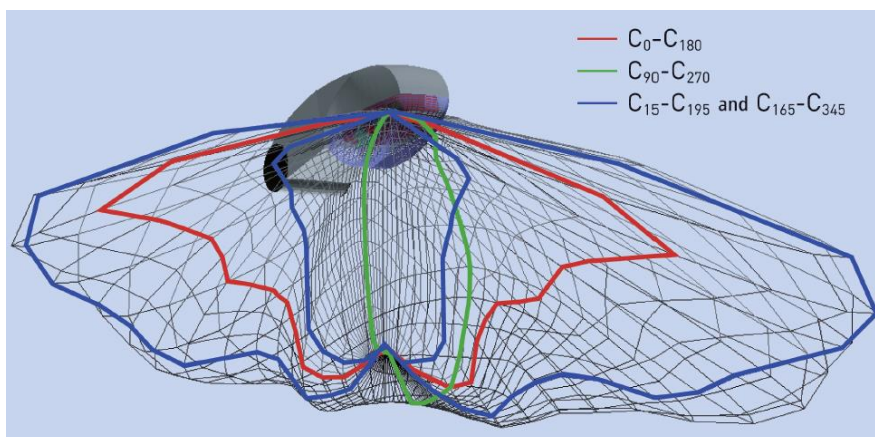
Poglavlje 9.3 – **goniofotometri** se normalno koriste za merenje raspodele svetlosnog intenziteta iz čega se može odrediti i ukupni svetlosni fluks. Goniofotometar je uređaj za merenje svetlosti emitovane od objekta merenja pod različitim uglovima. Upotreba ovih mernih instrumenta je porasla poslednjih godina sa razvojem LED tehnologije i LED izvora kod kojih prostorna raspodela svetlosti nije homogena (nije savršeno difuzna (na zrači istom sjajnošću) u svim pravcima, tj. LED izvori nisu „lambertijanski“ izvori [5]). Tip goniofotometra treba biti onaj kod kojeg se pozicija izvora svetlosti ne menja (uz uvažavanje gravitacije), tj. jedino je **tip C** dozvoljen za ova merenja (slika 5 [6]). Kod ovog tipa je fiksna vertikalna osa normalna na liniju merenja, dok je horizontalna osa paralelna glavnom smeru isijavanja izvora svetlosti. Ovaj tip goniofotometra uključuje i goniofotometre sa pokretnim detektorom i goniofotometre sa pokretnim ogledalom. Posebnu pažnju treba obratiti na to da svetlost reflektovana od mehaničke strukture goniofotometra (ili bilo koje druge strukture uključujući i sekundarne refleksije sa površine testiranog SSL (LED) uređaja) dođe do fotodetektora. Brzina rotacije opreme treba da bude takva da se minimizira poremećaj termičke ravnoteže (ekvilibrizacija) merenog LED uređaja.



Slika 5. Tip C goniofotometar [6]

Poglavlje 10.0 – za merenje raspodele svetlosnog intenziteta, mora postojati dovoljno velika distanca između goniofotometra i merenog objekta – generalno, više od 5 puta veća od najveće dimenzije SSL (LED) uređaja sa širokom raspodelom (veće distance su potrebne za uskosnopne izvore svetlosti). Elektronski podaci o izmerenoj raspodeli svetlosnog intenziteta treba da budu generisani i IES formatu za apsolutnu fotometriju specificiranom u standardu „*IES LM-63-02: Standard file format for electronic transfer of photometric data and related*

information“. Podaci u IES formatu su namenjeni projektantima za pouzdano previđanje nivoa osvetljenosti kroz svetlotehničke proračune. Ove fotometrijske podatke treba koristiti uz razumevanje da oni opisuju performanse pojedinačne svetiljke (one koja je testirana), ali i da ne predstavljaju obavezno prosečne performanse grupe istih LED svetiljki! Na slici 6 [7] prikazana je jedna tipična raspodela svetlosnog intenziteta za uličnu LED svetiljku.



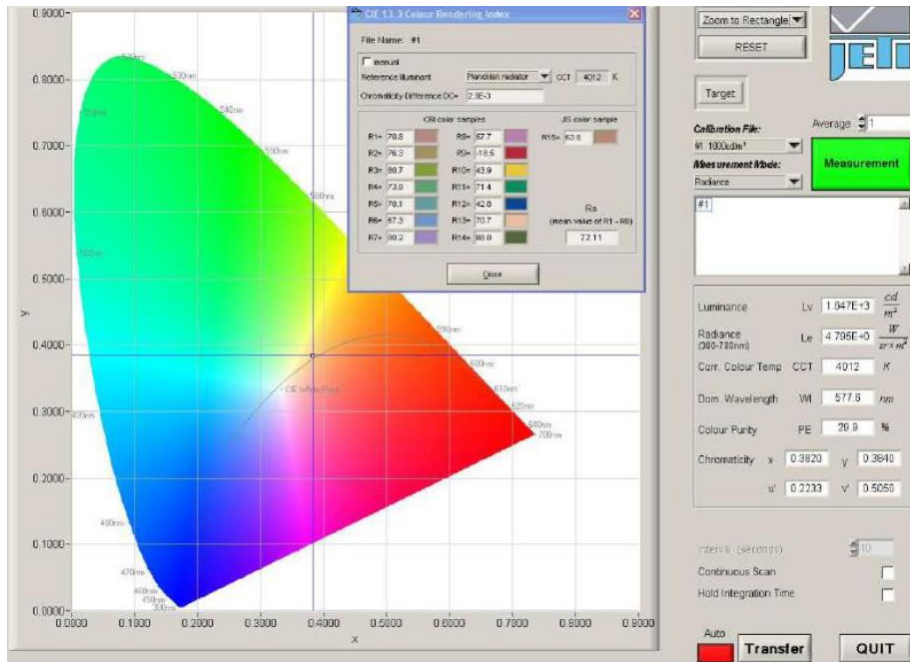
Slika 6. Tipična raspodela svetlosnog intenziteta za ulične svetiljke [7]

Poglavlje 11.0 – svetlosna iskoristivost (lm/W) jednog SSL (LED) uređaja (η_v) je data kao količnik izmerenog ukupnog svetlosnog fluksa Φ_{test} (lm) i izmerene ulazne električne snage P_{test} (W). Ova vrednost je svetlosna iskoristivost izvora i ne treba je mešati sa svetlosnom iskoristivošću zračenja koja predstavlja količnik svetlosnog fluksa (lm) i fluksa zračenja (W) izvora!

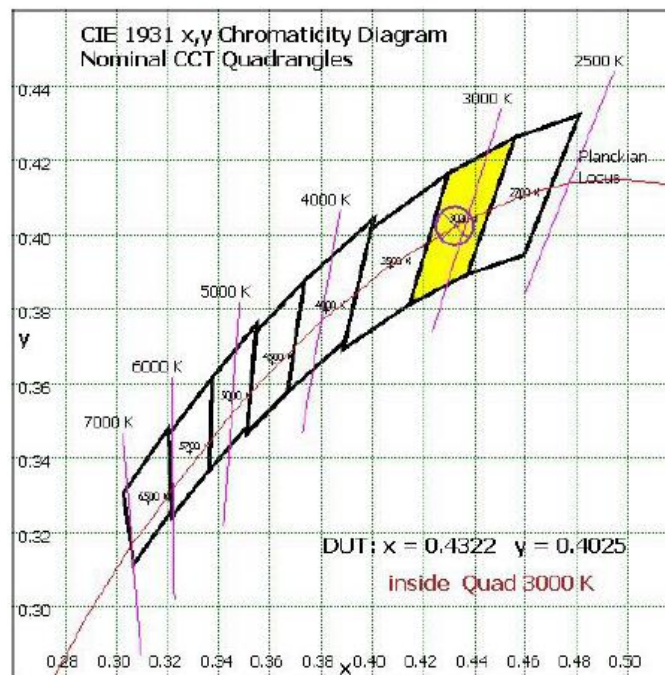
Poglavlje 12.1 – preporučeni metod za **merenje kolorimetrijskih karakteristika** je merenje ukupnog spektralnog fluksa (snage) zračenja koristeći **sistem sfera-spektroradiometar**.

U nastavku na slikama 7-9 [8,9] su dati tipični dijagrami koji se mogu (u ovom ili onom obliku i ne uvek svi) naći u LM-79 izveštajima proizvođača LED opreme, a na osnovu koji se određuju vrednosti **(tri)hromatskih koordinata**, vrednost **temperature boje svetlosti (CCT)** i **indeks reprodukcije boje (CRI)**.

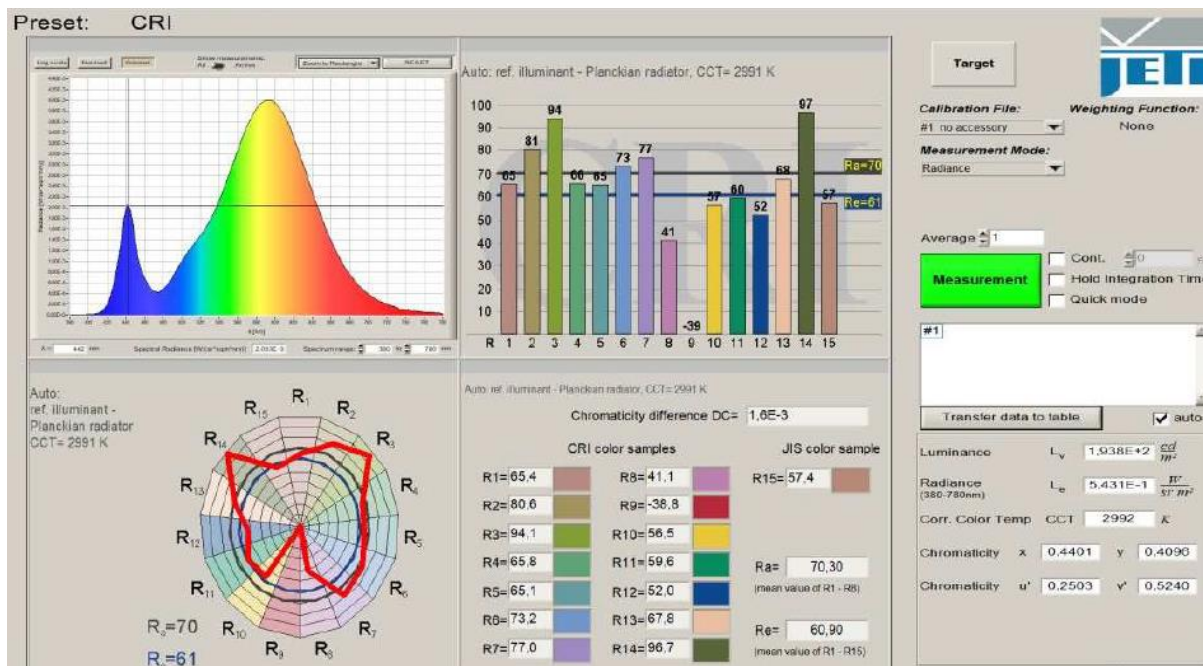
Ovde se treba podsetiti da se za određivanje boje nekog svetlosnog izvora (tela) koristi CIE dijagram boja (slika 7 [8]) iz 1931. godine (ili unapređeni CIE UCS (uniform chromaticity scale) dijagram boja iz 1960. godine) baziran na poznavanju vrednosti trihromatskih koordinata x i y (treća koordinata z se određuje poznavanjem prethodne dve). Takođe, na CIE dijagramu boje obično je prikazan Plankov lokus koji predstavlja krivu koja se dobija kada se na dijagramu boja spoje sve tačke koje odgovaraju bojama crnog tela na različitim temperaturama. Često su u LM-79 testnim izveštajima (u delu koji tretira merenja u sistemu integraciona sfera – spektroradiometar) javljaju i dijagrami sa Plankovim lokusom preko kojeg su raspoređeni tzv. ANSI kvadranti (prema ANSI C78.377A standardu) koji definišu granice (pravougaonike) za istu pridruženu temperaturu boje (slika 8 [9]). Ponekad se u nekim izveštajima prikazuje i kriva relativne raspodele snage zračenja u vidljivom opsegu talasnih dužina (slika 9 [8]).



Slika 7. CIE dijagram boja sa Plankovim lokusom [8]



Slika 8. ANSI C78.377A kvadranti sa Plankovim lokusom za odredivanje pridružene temperature boje CCT [9]



Slika 9. Dekartov i kružni prikaz relativne raspodele snage zračenja u vidljivom opsegu talasnih dužina za određivanje indeksa reprodukcije CRI [8]

Poglavlje 12.2 – ukoliko sistem sfera-spektroradiometar nije na raspolaganju ili ukoliko je testni uzorak prevelik, može se koristiti metod sa spektroradiometrom i/ili kolorimetrom koji meri hromatske karakteristike SSL (LED) uzorka u različitim pravcima. Ovo je najefikasnije uraditi montiranjem spektroradiometra ili kolorimetra na goniometar (takav merni instrument se zove **gonio-spektroradiometar** ili **gonio-kolorimetar**).

Poglavlje 14.0 – jedan detaljan LM-79 testni izveštaj treba da sadrži sledeće informacije, iako se u praksi mogu naći i izveštaji sa manjim brojem informacija: datum testiranja i naziv laboratorije gde je testiranje izvršeno; ime proizvođača i oznaka proizvoda; spisak merenih veličina (ukupni svetlosni fluks, svetlosna iskoristivost, itd...); nominalni električni parametri (naglasiti da li je AC (frekvencija) ili DC napajanje) i nominalna temperatura boje CCT; broj radnih sati pre testiranja (0h za nove proizvode); ukupno radno vreme svetiljke uključujući i period stabilizacije; temperatura ambijenta; orijentacija SSL (LED) uređaja za vreme merenja; vreme stabilizacije; fotometrijski metod ili korišćeni merni instrumenti (sfera-fotometar, sfera-spektroradiometar ili gonio-fotometar); oznaka i tip primenjenog referentnog standarda (snaga, tip izvora (lampe)); tip raspodele svetlosnog intenziteta - omnidirekciona ili usmerena); primenjeni korekcionni faktori (npr. spektralna korekcija, samoapsorpcija, raspodela svetlosnog intenziteta, itd...); fotometrijski merni uslovi (za sferu – prečnik sfere, refleksija završnog sloja zidova sfere, 4π ili 2π geometrija; za goniofotometar – fotometrijska distanca); izmereni ukupni svetlosni fluks (lm), ulazni napon (V), struja (A) i snaga svakog testiranog SSL (LED) proizvoda; raspodela svetlosnog intenziteta (ako je merena); kolorimetrijske veličine (hromatske koordinate, CCT, CRI); raspodela snage spektralnog zračenje (ako je primenljivo); širina talasnog opsega spektroradiometra (ako su spektralna raspodela i kolorimetrijske veličine deo izveštaja); korišćena oprema; izjava o mernoj nesigurnosti (ako je potrebno) i odstupanja od standardne merne procedure (ako ih ima).

2. Relativna i apsolutna fotometrija

Kod fotometrijskih merenja tradicionalnih izvora svetlosti i svetiljki, radni uslovi se razlikuju u zavisnosti od tipa izvora svetlosti. Ti radni uslovi uključuju referentni balast, električne veličine, vreme stabilizacije, način rukovanja izvorom (sijalicom), itd... Različiti standardi su kreirani za različite tipove izvora svetlosti (natrijum visokog pritiska, metal-halogeni, živa, fluo i kompakt fluo izvori, ...), pa čak i za svetiljke predviđene za rad sa više različitih tipova izvora svetlosti. Standardi za merenja LED izvora su bili neophodni jer se LED izvori razlikuju od tradicionalnih izvora kada je reč o radnim i temperaturnim uslovima.

SSL uređaji se mogu javljati u formi sijalica (integrisane LED sijalice) ili svetiljki čije dimenzije variraju od veličine manje sijalice do veličine većih svetiljki sa fluo cevima. U zavisnosti od te veličine, ovi uređaji se mogu meriti u integracionoj sferi ili goniofotometru.

Tradicionalno, fotometrijska merenja se vrše odvojeno za izvore svetlosti (sijalice) i svetiljke prema različitim testnim metodima. Merenja na izvorima svetlosti se tipično vrše u integracionoj sferi (mere se ukupni svetlosni fluks i hromatske koordinate), a na svetiljkama sa goniofotometrom (mere se raspodela svetlosnog intenziteta i stepen iskorišćenja svetiljke).

Ipak, za najveći broj postojećih LED svetiljki, LED sijalice (izvori) ne mogu biti odvojeni od svetiljki, pa nijedan od postojećih standarda nije primenjiv na LED tehnologiju. Tradicionalne svetiljke se uobičajeno testiraju sa goniofotometrom koristeći proceduru (metod) koja je poznata kao **relativna fotometrija**. Ovaj metod podrazumeva da se merenja vrše odvojeno za „goli“ izvor svetlosti i svetiljku. Tada se podaci o raspodeli svetlosnog intenziteta svetiljke „normiraju“ sa izmerenim ukupnim svetlosnim fluksom izvora korišćenog u testiranoj svetiljci. To omogućava da se tabele svetlosnog intenziteta daju kao normirane, tj. vrednosti svetlosnog intenziteta odgovaraju svetlosnom fluksu od 1000 lm (u relativnom odnosu 1cd/1000lm). To omogućava upotrebu istih tabela za različite izvore svetlosti istog tipa i snage, a istih ili sličnih električnih (snaga), fotometrijskih (svetlosni fluks) i geometrijskih karakteristika (oblik i dimenzije sijalice). Razlike koje se mogu javiti u izmerenom fluksu usled promenjene geometrije svetiljke su beznačajne, što dovodi do toga da je u slučaju konvencionalnih izvora svetlosti usvojeno i istorijski potvrđeno u praksi da je merenje na samo jednom uzorku dovoljno za određivanje i definisanje fotometrijskih karakteristika!

Relativna fotometrija nije primenjiva na LED izvore iz jednog suštinskog razloga, čak i u slučaju kada LED izvori mogu biti odvojeni od svetiljki i zasebno testirani – **ako se LED izvor pusti u rad izvan svetiljke (nezavisno), svetlosni fluks tog izvora se značajno razlikuje zbog drugačijih termičkih uslova**! Upravo činjenica da tradicionalni izvori svetlosti nisu previše osetljivi na temperaturne uticaje (bilo da su testirani izvan ili unutar svetiljki) predstavlja glavni razlog zašto je metod relativne fotometrije podesan za testiranje svih tradicionalnih izvora!

Metod merenja poznat kao **apsolutna fotometrija** predviđa da se apsolutna raspodela svetlosnog intenziteta meri bez odvojenih (zasebnih) merenja na izvoru svetlosti, a upravo ovaj metod se se nameće kao jedino preporučljivo rešenje za LED izvore svetlosti. Za razliku

od konvencionalnih izvora svetlosti, jedno merenje nikako nije dovoljno za LED izvore gde se rezultati merenja značajno razlikuju za različite LED izvore! LED tehnologija je takva da zapravo ne postoje 2 istovetna LED izvora, čak ni u okviru iste fabričke serije istog proizvođača (prilikom proizvodnje LED nije moguće dobiti dve identične diode sa identičnim karakteristikama). Upravo zato se i vrši tzv. binovanje koje predstavlja klasifikaciju LED čipova sa što sličnijim relevantnim karakteristikama nakon okončanog proizvodnog procesa prema boji (dominantnoj talasnoj dužini), fluksu i radnom naponu diode, a pri nominalnoj struji i temperaturi PN spoja od 25°C. LM-79 dokument ne propisuje broj potrebnih merenja LED izvora, kao ni način uzorkovanja i usrednjavanja dobijenih rezultata, već je to ostavljeno regulatornim telima ili samim kupcima (dozvoljena tolerancija u razlikama između individualnih LED proizvoda umnogome zavisi i od vrste i mesta primene).

3. Merenja svetlosnog fluksa i stepena iskorišćenja svetiljke (LOR)

Sa prodorom LED tehnologije u svet tehnike osvetljenja u potpunosti je redefinisani pristup projektima osvetljenja, a sa njim i složenost i brojnost zahteva u tehničkom delu tenderskih specifikacija. Za razliku od tradicionalne HID tehnologije (izvori kod kojih svetlost nastaje kao rezultat električnog pražnjenja u gasu) koja je gotovo neosetljiva na temperaturne promene, elektromagnetske smetnje ili prenaponske udare, LED tehnologija zasnovana na prekidačkoj SMPS elektronici je veoma podložna svim navedenim štetnim uticajima. Takođe, zbog većeg prisustva talasnih dužina koje odgovaraju plavom delu spektra u spektru tipičnog LED izvora svetlosti, i fotobiološka bezbednost (štetni uticaj plave svetlosti na oči posmatrača ili poremećaj cirkadijalnog ritma) je parametar od velikog značaja. Sa električnog aspekta, HID tehnologija je pružala sužen broj mogućnosti jer su izvori pravljani u nekoliko standardizovanih vrednosti snaga (npr. u javnom osvetljenju 70W, 100W, 150W, 250W ili 400W), a svaka svetiljka je nakon isporuke mogla imati samo tu jednu određenu snagu (eventualno dve, usled upotrebe dvostepenih balasta u retkim situacijama). Kod LED tehnologije, praktično svaka svetiljka može zahvaljujući standardizovanim dimabilnim LED drajverima obezbediti ogroman broj kombinacija radne struje za LED izvore, a posledično i ogroman broj kombinacija svetlosnog fluksa i snage. Pored toga, posmatrajući čisto fotometrijski aspekt, sve više se javljaju zahtevi za definisanjem ulaznog fluksa (fluksa LED izvora) ili izlaznog fluksa (fluksa svetiljke), kao i za efikasnošću (lm/W) ili stepenom iskorišćenja svetiljke. Dok je kod HID izvora indeks reprodukcije boje (CRI) uglavnom bio poznat za svaki tip HID izvora, a temperatura boje svetlosti (CCT) se kretala u znatno užem opsegu sa samo nekoliko vrednosti, kod LED izvora je na raspolaganju znatno veći broj kombinacija.

Važno je napomenuti da su zahtevi za vrednostima ulaznog/izlaznog fluksa ili efikasnosti svetiljke najčešće neopravdani jer nisu garant izbora optimalne opreme. Npr., može se desiti da kvalitetna optika i dobar termički dizajn svetiljke obezbede efikasniju raspodelu svetlosnog intenziteta i odgovori fotometrijskim zahtevima tenderima (klase osvetljenja prema važećim standardima, npr. SRPS EN 13201:2016: „Osvetljenje puteva“) od neke druge opreme sa nominalno višim vrednostima fluksa i efikasnosti. *Upravo zato, svetlotehnički proračun kojim*

se dokazuje ispunjenje svetlotehničkih uslova projekta mora biti jedini relevantan parametar za definisanje LED opreme!

Često se u projektnim ili tendrskim tehničkim opisima može naići na zahtev za stepenom iskorišćenja svetiljke (često se javlja pod oznakom LOR – Light Output Ratio) od 100%!

Da bi se shvatila suština ovakvog zahteva, treba najpre videti šta ta vrednost predstavlja.

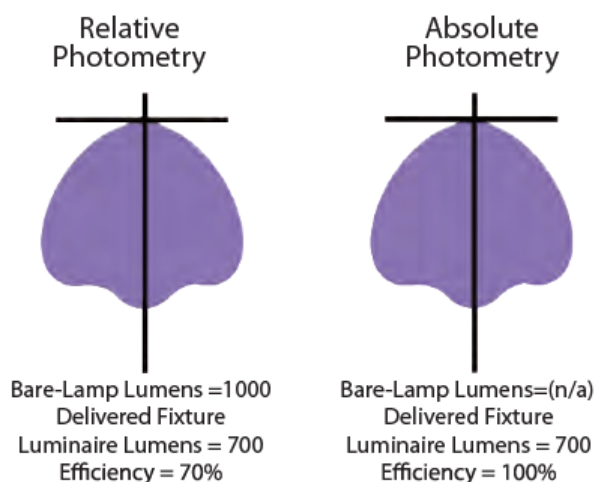
U CIE publikaciji „CIE DIS 025/E:2014 - Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules [10]“, u poglavlju 3.31 – Light output ratio of a luminaire, piše:

„**LOR** – ratio of the total luminous flux of the luminaire, measured under specified practical conditions with its own lamp(s) and equipment, to the sum of the individual luminous fluxes of the same lamp(s) when operated outside the luminaire with the same equipment, under specified conditions.

Note 1 to entry: Equivalent term used in the US: „Luminaire efficiency“.

Note 2 to entry: LOR may be determined for LED luminaires using interchangeable sources (e.g. LED lamps) in some cases. The use of LOR is disregarded for LED luminaires with non-replaceable LED light sources. **For LED luminaires with non-replaceable LED light sources, only the total flux of the luminaire can be measured, in which case LOR is 100% as a consequence and not significant.**“

Podsećanja radi, **stepen iskorišćenja (LOR) se definiše kao odnos svetlosnog fluksa koji svetiljka izrači i ukupnog fluksa svih izvora svetlosti u njoj.** Ovo nas vraća na definiciju relativne i apsolutne fotometrije, gde se kaže da je u slučaju apsolutne fotometrije moguće izmeriti jedino ukupni svetlosni fluks svetiljke (ne i izvora), pa je u tom slučaju stepen iskorišćenja (LOR) uvek jednak jedinici, tj. 100% (slika 7 [9])! Praktično, ulazni fluks je u tom slučaju svetlosni fluks kompletne svetiljke izmeren nakon perioda stabilizacije, a izlazni fluks ista ta vrednost.



Slika 10. Relativna i apsolutna fotometrija [11]

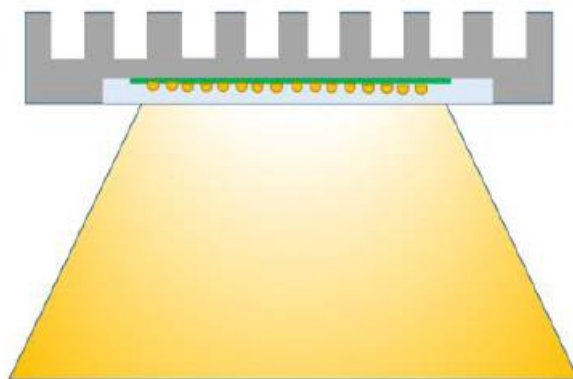
Kada su rezultati predstavljeni na ovaj način, matrice (elektronski fajlovi sa tabelama svetlosnog intenziteta) generisane na ovaj način su poznate i kao „**total flux**“ matrice. Kada su podaci snimljeni na drugi način o kojem će biti reč u nastavku, tada stepen iskorišćenja (LOR) nije obavezno jednak 100% i takve matrice se nazivaju „**efficiency**“ matrice.

Svim fotometrijskim i kolorimetrijskim merenjima koja vrše proizvođači LED svetiljki, prethodi isti set merenja na pojedinačnim LED čipovima za koje proizvođač LED čipova (npr. Cree, Osram, Nichia, Seoul semiconductors,...) dostavlja dobijene rezultate. Kada je reč o spoljnom (javnom) osvetljenju, ti LED čipovi su najčešće organizovani u veće strukture, npr. LED module. U većini slučajeva, sam proizvođač LED svetiljki je odgovoran za dizajn takvih LED modula, izradu štampanih ploča i dodavanje drugih neophodnih elektronskih komponenti. Upravo od takvog formiranog LED modula počinje proces fotometrijskih i kolorimetrijskih merenja.

Merenja na „golom“ LED izvoru se ne mogu relativizovati kao u slučaju relativne fotometrije, tj. jednom izmerene vrednosti na nekom referentnom izvoru se ne mogu upotrebiti kod iste LED svetiljke ako se koriste neki drugi LED izvori (svakom merenju na LED svetiljci mora prethoditi merenje na LED izvoru svetlosti)! U aneksu 3.2 standarda „EN62717:2017 - LED modules for general lighting - Performance requirements“ koji predstavlja ključni standard koji definiše karakteristike LED modula, zajedno sa metodama i uslovima ispitivanja, kaže se da je **metod za merenje svetlosnog fluksa LED modula još uvek u fazi razmatranja**. Upravo iz tog razloga se otvara prostor za različita tumačenja stepena iskorišćenje, ulaznog i izlaznog fluksa od strane različitih proizvođača LED svetiljki. Različiti načini tumačenja će biti objašnjeni u nastavku.

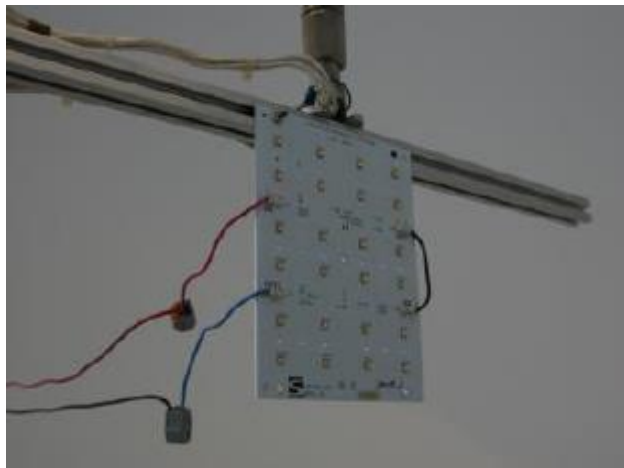
Budući da je metod merenja izlaznog fluksa (fluksa svetiljke) isti kao i kod tradicionalnih izvora (merenje se vrši sa goniofotometrom), počeo se od njegove definicije:

Izlazni fluks se definiše kao izlazni fluks LED svetiljke nakon perioda stabilizacije, na temperaturi ambijenta od 25°C i sa definisanom (referentnom) radnom strujom (slika 11 [12]).



Slika 11. Merenja na LED svetiljci sa goniofotometrom [12]

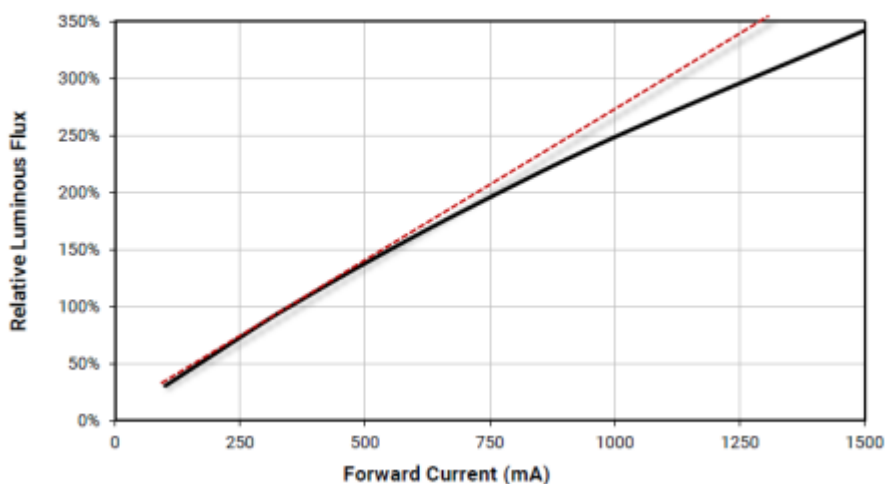
Iako LM-79 metod ne priznaje ovakva merenja, većina proizvođača LED svetiljki u ovom prelaznom periodu testira LED module u integracionoj (Ulbrichtovoj) sferi sa referentnim LED drajverom (slika 11 [12]), a isključivo za potrebe određivanja LOR (integraciona sfera se standardno koristi za određivanje kolorimetrijskih veličina).



Slika 12. Merenja na LED modulu u integracionoj (Ulbrichtovoj) sferi [13]

LED modul (tzv. PCBA - printed circuit board assembly) čine štampana ploča (PCB) i LED čipovi. Upravo na ovom mestu počinju problemi, jer fluks izvora značajno zavisi od dva faktora – radne struje (I_f – forward current) i temperature ambijenta (T_a). Većina proizvođača LED svetiljki usvaja određenu struju kao nominalnu (referentnu), pa će se u ovom primeru pretpostaviti da je **referentna struja 350 mA**! Na slici 13 [13] prikazana je zavisnost svetlosnog fluksa od radne struje kojom se napaja LED izvor.

RELATIVE FLUX VS. CURRENT ($T_j = 85\text{ }^\circ\text{C}$)



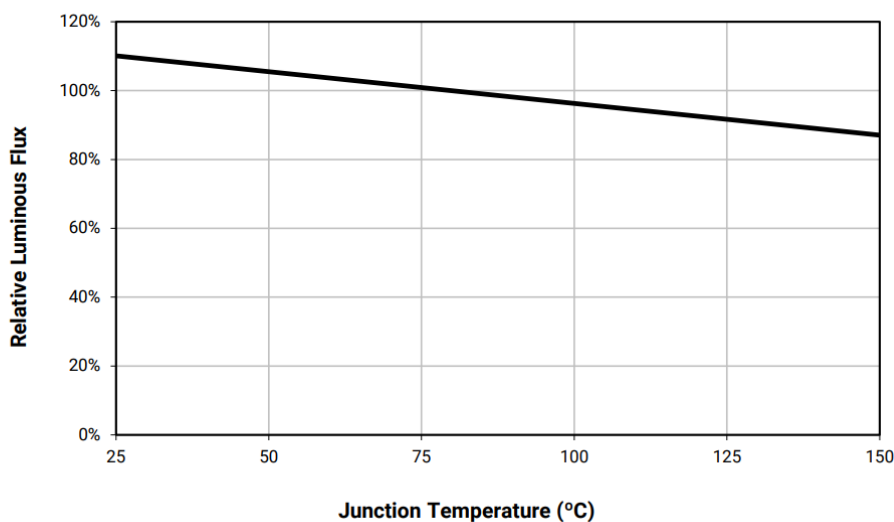
Slika 13. Zavisnost svetlosnog fluksa od radne struje kojom se napaja LED izvor [13]

Pored izabrane referentne struje, većina proizvođača specificira svoje proizvode i za neke druge vrednosti struja (npr. 500 mA, 700 mA i 1000 mA) koje se mogu smatrati tipičnim. Merenja se vrše za sve navedene vrednosti struja, pri čemu se određuju tzv. **strujni**

koeficijenti koji definišu relativni porast svetlosnog fluksa svetiljke (slika 13) pri tipičnoj (ili nekoj drugoj) radnoj struji različitoj od referentne (350 mA). Na strujni koeficijent utiče termički dizajn svetiljke, tip LED izvora i broj LED čipova u svetiljci. Poznato je da kod LED izvora svetlosti efikasnost (lm/W) pada sa porastom struje (tzv. „droop“ efekat), pa nije iznenađenje što je npr. u slučaju dvostruko veće struje ($2 \times 350 \text{ mA} = 700 \text{ mA}$) svetlosni fluks veći za npr. 87%, a ne dvostruko (strujni koeficijent je 1.87). Poznavanjem vrednosti strujnih koeficijenata lako se određuje svetlosni fluks svetiljke na nekoj drugoj radnoj struji prostim množenjem vrednosti fluksa izmerenog na referentnoj struji 350 mA i strujnog koeficijenta.

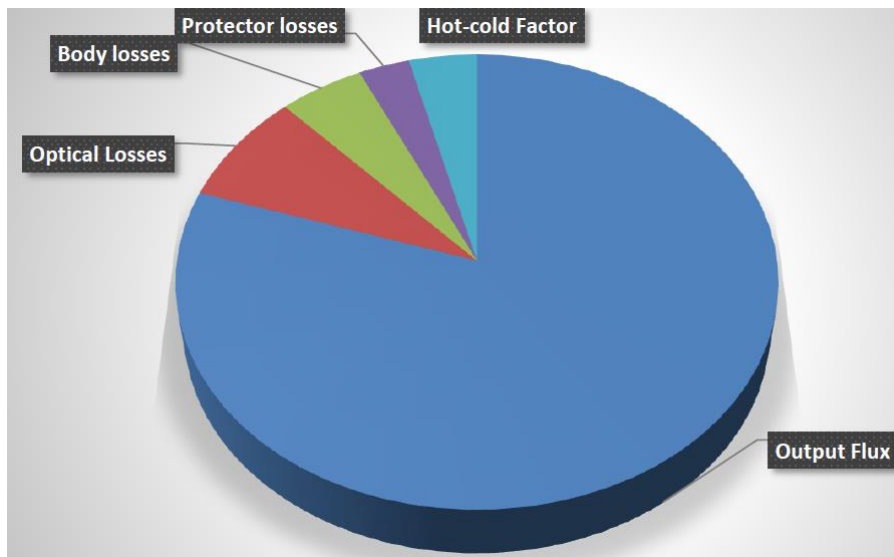
Svetlosni fluks izvora opada usled porasta temperature, a taj fenomen je poznat kao **faktor toplih i hladnih lumena** (HOT – COLD faktor). Npr., na slici 14 [13] može se videti da svetlosni fluks opada za 6.6% pri porastu temperature od 30°C (sa 25°C na 55°C).

RELATIVE FLUX VS. JUNCTION TEMPERATURE - WHITE ($I_f = 350 \text{ mA}$)



Slika 14. Zavisnost svetlosnog fluksa od temperature okruženja [13]

Merenje je moguće izvršiti neposredno nakon uključenja izvora, pri čemu se uzima da je temperatura ambijenta nepromenjena (25°C) jer su merni intervali veoma kratki (ceo interval merenja u trajanju od nekoliko stotina ms, pri čemu je on sastavljen od povorke strujnih impulsa – svaki u trajanju od nekoliko desetina ms) i ne ostavljaju izvoru dovoljno vremena za zagrevanje i stabilizaciju. Moguće je i uračunati ovu promenu temperature na PN spoju (T_j) za ovaj kratki interval i uvrstiti korekzione faktore (npr. nakon 400 ms temperatura ambijenta je 35-40°C, a fluks opada 2-2.5 % pri porastu temperature od 10°C). Treba imati u vidu da na stepen iskorišćenja svetiljke pored struje i temperature utiču i mehanički gubici (npr. nosači („ruke“) na urbanim svetiljkama mogu asporbovati svetlost). Na dijagramu 1 [13] ispod dati su svi parametri (tipični gubici) koji utiču na stepen iskorišćenja (LOR) jedne tipične LED svetiljke.



Slika 15. Faktori (tipični gubici) koji utiču na stepen iskorišćenja tipične LED svetiljke [13]

Može se konstatovati sledeće: *merenje izlaznog fluksa je jasno definisano, dok za merenje ulaznog fluksa ne postoji jasna standardom propisana procedura!*

To ostavlja prostor proizvođačima da sami izaberu da li će ulazni fluks meriti:

1. *neposredno nakon uključenja LED modula, pri čemu je temperatura u mernoj tački na LED modulu (T_s – solder point temperature, mesto spoja LED čipa sa postoljem)) praktično jednaka temperaturi ambijenta od 25°C ,*
2. *nakon perioda stabilizacije, pri čemu temperatura u mernoj tački na LED modulu (T_s) dostiže vrednost od 55°C pri temperaturi ambijenta od 25°C , i*
3. *nakon perioda stabilizacije, pri čemu temperatura u mernoj tački na LED modulu (T_s) dostiže vrednost od 85°C pri temperaturi ambijenta od 25°C .*

Ove dve vrednosti temperature (55°C i 85°C) nisu nasumično izabrane, već su to pripisane temperature koje metod „LM-80-08: Approved method: Measuring lumen maintenance of LED-Light Sources“ definiše kao referentne za merenje svetlosnog fluksa LED izvora (pojedinačnog čipa ili modula) u trajanju od najmanje 6000h (standard predviđa i treću vrednost temperature po izboru proizvođača opreme). Važno je napomenuti da je prednost prvog metoda (merenje „hladnih“ lumena) u tome što su merenja znatno brža (ne postoji period stabilizacije i dodatna oprema za održavanje LED izvora na određenoj temperaturi), pa je moguće i izvršiti veći broj merenja na istom uzorku i tako dobiti mnogo preciznije (usrednjene) vrednosti svetlosnog fluksa. Kod druga dva metoda, iako čak i prihvatljivija sa tehničkog aspekta, proizvođač opreme nema taj luksuz jer merenja traju znatno duže.

Upravo tri iznad navedene temperature daju tri moguće definicije stepena iskorišćenja LED svetiljke, kao posledice tri moguća načina merenja ulaznog fluksa LED izvora svetlosti!

Kroz primer koji tretira sva tri načina određivanja LOR biće objašnjeno zašto podatak o stepenu iskorišćenja svetiljke nije pravo merilo stvari, pri tome znajući da koja god da je prikazana vrednost stepena iskorišćenja, izlazni fluks ostaje isti u sva tri slučaja (menja se samo ulazni fluks u zavisnosti od trenutka u kojem se meri)! Prava efikasnost (svetlosna iskoristivost) sistema u lm/W se ne menja!

PRIMER:

Uzima se svetiljka sa 32 LED čipa koja daje svetlosni fluks od 4403 lm na radnoj struji od 350 mA i temperaturi ambijenta od 25°C. Još jednom treba napomenuti da ovaj fluks ostaje isti bez obzira na vrednost stepena iskorišćenja. Na osnovu podataka dobijenih od proizvođača LED čipova (uzet je XP-G2 bin S2 čip proizvođača CREE) poznate su vrednosti svetlosnog fluksa za 3 tretirane temperature (tabela 1).

Tabela 1. Vrednosti svetlosnog fluksa pojedinačnog LED čipa za različite temperature Ts

I LED (mA)	Ts (°C)	Flux/LED (lm) ¹²
350	25	160
350	55	148.7
350	85	139.8

Na osnovu tabele 1 određuje se ulazni fluks LED modula za sva 3 slučaja množenjem broja LED čipova (32 LED čipa) sa svetlosnim fluksom po LED čipu (160 lm/LED, 148.7 lm/LED ili 139.8 lm/LED).

Definicija 1

Stepen iskorišćenja (LOR) = fluks svetiljke / fluks LED modula (350 mA, Ts = 25°C) =
= 4403 lm / 32 LED x 160 lm/LED = **86 %**

Definicija 2

Stepen iskorišćenja (LOR) = fluks svetiljke / fluks LED modula (350 mA, Ts = 55°C) =
= 4403 lm / 32 LED x 148.7 lm/LED = **92.5 %**

Definicija 3

Stepen iskorišćenja (LOR) = fluks svetiljke / fluks LED modula (350 mA, Ts = 85°C) =
= 4403 lm / 32 LED x 139.8 lm/LED = **98.4 %**

Za istu svetiljku koja isporučuje isti (izlazni) fluks, moguće je „veštački“ povećati stepen iskorišćenja svetiljke (LOR) igrajući se sa podacima i tumačenjem definicija!

4. Zaključak

U prethodnom poglavlju su predstavljeni načini na koje je moguće odrediti stepen iskorišćenja LED svetiljki (LOR) i to merenjem kompletne LED svetiljke pomoću goniofotometra u stabilnim radnim uslovima i merenjem fluksa LED modula u integracionoj sferi na određenoj struji i temperaturi ambijenta ili prosto korišćenjem mernih rezultata proizvođača LED čipova uz određene korekzione faktore. Ono što je gurnuto u drugi plan je činjenica da prema važećim standardima merenje „golog“ LED izvora svetlosti više nije moguće, a stepen iskorišćenja više nije relevantan podatak kao u slučaju tradicionalnih izvora! Zapravo, jedini razlog zbog kojeg se još uvek meri fluks izvora i stepen iskorišćenja (razni proizvođači to rade na različite načine) je zato što postoji takav zahtev na tržištu, tj. LOR i fluks izvora se često javljaju u tenderskim specifikacijama.

Ako se želi ići tehnički ispravnim putem i primeniti metod apsolutne fotometrije, jedini podatak koji proizvođač svetiljki treba da dostavi investitoru je **fluks svetiljke (lm)**, a posledično i **stvarna efikasnost (svetlosna iskoristivost lm/W)** iste! Podatak o ulaznom fluksu ili LOR nije od značaja i kako je pokazano u prethodnom poglavlju, ne daje realnu predstavu o fotometrijskim veličinama i umnogome zavisi od tumačenja postojećih definicija iz vremena tradicionalnih HID izvora. Metod LM-79 definiše put kojim treba ići, a pored njega postoje i drugi relevantni standardi koji se bave merenjima LED svetiljki („CIE DIS 025/E:2014 - Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules“ i „EN 13032-4:2015 - Light and lighting. Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires. LED lamps, modules and luminaires“). Standard „EN 13032-1:2012 - Light and lighting - Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires - Part 1: Measurement and file format“ nije primenjiv na LED tehnologiju jer tretira stepen iskorišćenja (LOR).

I na kraju, najvažniji podatak koji se može dobiti o jednoj LED svetiljci je svetlotehnički proračun kojim se potvrđuje ispunjenost uslova za određene svetlotehničke klase, bez obzira na vrednost fluksa LED izvora ili LED svetiljke, efikasnost (lm/W) ili stepen iskorišćenja LED svetiljke (LOR)!

Upravo iz tog razloga se preporučuje investitorima da izbor LED opreme prilagode realnim terenskim potrebama, tj. da svakoj specifikaciji ili nabavci prethodi svetlotehnička komparativna analiza koja treba da ima prost zadatak – izabrati onu opremu sa kojom su zadovoljeni zadati svetlotehnički uslovi (priložiti svetlotehničke proračune kao dokaz), a zatim ići dalje u komparativnu analizu energetske efikasnosti (instalisanе snage LED svetiljki) i cene, a posledično i perioda otplate takve investicije.

Literatura

1. „IES LM-79-08, Approved method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products“, Illuminating Engineering Society, 2008.
2. Yoshi Ohno, „IESNA standards on LED and SSL: LM-79, LM-80, and future standards“, CORM 2009 Conference, Gaithersburg, MD, Maj 6-8, 2009.
3. „Colorimetry and lab measurements“, R-Tech, Schröder interni dokument, April 2014.
4. „Efficiency, current coefficient and output flux“, R-Tech, Schröder interni dokument, Mart 2017.
5. Goniofotometar, <https://en.wikipedia.org/wiki/Goniophotometer>
6. Goniofotometar Tip C – slika uređaja, <https://www.labsphere.com/labsphere-products-solutions/light-metrology/goniophotometers/type-c-moving-mirror/>
7. „Reliable Planning with LED Lighting“, ZVEI - German Electrical and Electronic Manufacturers' Association, Novembar 2013.
8. „41878.Appendix“, R-Tech, Schröder interni dokument, aneks LM-79 izveštaja, 2018.
9. „LM-79-08 test report for Philips (China) Investment Co.,Ltd. InstantFit LED tube.“, <http://www.alconlighting.com/specsheets/Philips/LM79%20test%20report.pdf>
10. „CIE DIS 025/E:2014 - Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules“, CIE publikacija, 2014.
11. „White Paper: Photometric Measurement. Photometric Measurement of LED Luminaires“, Holophane, 2015., https://holophane.acuitybrands.com/-/media/Files/Holophane/education/technical%20topics/WPaper_MeasurementandEfficiency%20pdf.pdf
12. „Why matrix efficiency is not always important ?“, R-Tech, Schröder interni tehnički izveštaj, Novembar 2017.
13. „Efficiency, Current Coefficient and output flux“, R-Tech, Schröder interni tehnički izveštaj, Mart 2017.