

Ana Drndarević, dipl.el.inž.
Minel-Schröder, Beograd

OSVETLJENJE TUNELA ULAZNI PARAMETRI I KRITERIJUMI KVALITETA

KRATAK SADRŽAJ

Bezbedno odvijanje saobraćaja u tunelu zahteva kvalitetno osvetljenje koje će obezbediti kontinuitet u vidnim performansama vozača i ublažiti probleme vizuelne adaptacije sa kojom je vozač suočen prilikom ulaska u tunel u dnevnim uslovima vožnje.

U radu su opisani ulazni parametri neophodni za izradu projekta osvetljenja tunela i izdvojeni kriterijumi kvaliteta i zahtevi koje je potrebno ispuniti. Presentovane su razlike u zahtevanim vrednostima merodavnih fotometrijskih parametara definisanih važećim preporukama.

Primena svetiljki sa LED tehnologijom i savremenih sistema za nadzor i upravljanje je u proteklih nekoliko godina postala standard u ovoj oblasti. U radu je dat osvrt na neke od brojnih prednosti primene novih tehnologija u osvetljenju tunela.

1. UVOD

Na zahteve za osvetljenje tunela utiče nekoliko kritičnih faktora koji određuju vidljivost. Oni su promenljivi i obuhvataju karakteristike vozača, fizičke uslove puta, obradu zidova unutar tunela, okruženje tunela, smer vožnje, dužinu tunela, atmosferske uslove, gustinu saobraćaja, brzinu vožnje, tip vozila u tranzitu.

Zadatak osvetljenja je da obezbedi uslove vidnog komfora koji su neophodni za bezbedno odvijanje saobraćaja. Pri tome je noćno osvetljenje uobičajeno, slično osvetljenju saobraćajnica, dok osvetljenje tunela u dnevnim uslovima zahteva poseban tretman, sa veoma visokim fotometrijskim zahtevima. Precizno postavljeni i korektno realizovani, ovi zahtevi treba da obezbede da opadanje vizuelnih performansi vozača koji ulazi u tunel i putuje kroz njega bude u granicama prihvatljivog.

2. ULAZNI PARAMETRI

Prilikom izrade rešenja osvetljenja tunela najpre je potrebno definisati sve neophodne ulazne parametre, pri čemu je važno napomenuti da promena samo jednog od ulaznih parametara bitno utiče na rešenje i praktično znači izradu novog projekta.

2.1. Brzina vožnje i dužina zaustavnog puta

Projektovana brzina vožnje utiče na određivanje niza fotometrijskih parametara i zahteva koje je potrebno ispuniti. Kako je vreme potrebno za adaptaciju očiju vozača direktno srazmerno sa pređenim putem, odnosno brzinom vožnje, jasno je da pri većim brzinama mogu da nastanu potencijalno opasne situacije. Iz tih razloga su fotometrijski zahtevi za osvetljenje tunela pri većim brzinama vožnje dosta stroži.

Na osnovu propisane brzine vožnje određuje se dužina zaustavnog puta, kao minimalno rastojanje na kome vozač može da bezbedno zaustavi vozilo. Dužina zaustavnog puta potrebnog za bezbedno kočenje i zaustavljanje vozila se izračunava prema formuli 1.

$$SD = u * t_o + \frac{u^2}{2 * g * (f \pm s)} \quad (1)$$

gde je:

u – brzina vožnje u m/s

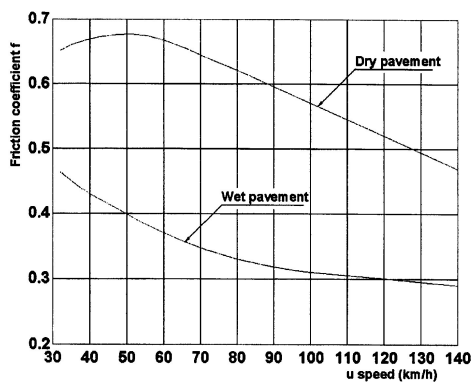
t_o – vreme reagovanja, uzima se da je 1 sekunda

g – gravitaciono ubrzanje

f – koeficijent trenja između točkova i podloge (merodavan je podatak za mokar kolovoz)

s – nagib puta (+ za uzbrdicu, - za nizbrdicu)

Koeficijent trenja u funkciji projektovane brzine se može očitati sa dijagrama na slici 1, pri čemu se uzima nepovoljnija vrednost koja odgovara krivoj za mokar kolovoz (Wet pavement).



Slika 1. Koeficijent trenja u funkciji brzine vožnje

Nagib puta utiče na dužinu zaustavnog puta. Ukoliko je ispred tunela nizbrdica potrebno je duže vreme, odnosno pređeni put, za bezbedno zaustavljanje vozila. U tabeli 1 prikazane su izračunate dužine zaustavnog puta za neke karakteristične brzine vožnje i nagibe puta.

Tabela 1: Dužina zaustavnog puta u funkciji brzine vožnje i nagiba puta

Brzina / nagib puta	60 km/h	80 km/h	100 km/h	120 km/h
5%	51m	89m	137m	195m
3%	52m	92m	144m	205m
1%	54m	97m	151m	216m
0%	55m	99m	155m	222m
-1%	56m	101m	159m	229m
-3%	58m	106m	169m	243m
-5%	61m	112m	180m	260m

2.2. Orijentacija tunelskih cevi i smer vožnje

Smer vožnje utiče na određivanje sjajnosti prilazne zone (L_{20}) i sjajnosti koju je potrebno obezbediti na samom ulazu u tunel (sjajnost zone praga L_{th}). Određuje se na osnovu građevinske podloge (situacije) i orijentacije tunela u odnosu na strane sveta.

2.3. Protok saobraćaja

Za izradu projekta osvetljenja tunela i određivanje zahtevanih fotometrijskih parametara, potrebno je pribaviti podatak ili odrediti protok saobraćaja iskazan kao broj vozila po voznoj traci u vršnom satu.

Podatak o protoku saobraćaja u vršnom satu nije uvek dostupan i poznat. U slučaju da ovaj podatak nije dostupan, koristi se podatak o prosečnom dnevnom protoku saobraćaja (ADT – Average Daily Traffic) koji je najčešće korišćen koncept u planiranju saobraćaja. Na osnovu podatka o ADT, broj vozila u vršnom satu se određuje kao 10% ADT u ruralnim područjima ili 12% ADT u gradskim područjima. Za puteve bez razdvojenih kolovoza, broj vozila po vršnom satu i po voznoj traci se može izračunati deljenjem protoka u vršnom satu sa ukupnim brojem saobraćajnih traka. Ukoliko je za autoput ADT izražen za oba smera vožnje i ukoliko nije poznata raspodela po smeru, onda se može pretpostaviti odnos 1:2. Zatim će se veći promet podeliti sa brojem traka ovog kolovoza [1].

2.4. Geometrija tunelskih cevi i podaci o refleksionim svojstvima kolovoza i zidova

Podaci o geometriji tunelske cevi su definisani na građevinskim i saobraćajnim podlogama, a za izradu projekta osvetljenja tunela merodavni su sledeći parametri:

- Broj i širina voznih traka;
- Udaljenje ivice kolovoza od levog i desnog zida (računa se od ivice vozne trake do zida);
- Visina tunelske cevi i moguće pozicije za postavljanje svetiljki;
- Pozicije i dimenzije zaustavnih niša i poprečnih prolaza;
- Završna obrada zidova tunela i podatak da li su farbani (za tunelske cevi u kojima je predviđeno da se zidovi farbaju u belu boju uobičajeno se uzima da je refleksioni koeficijent površine zida sa uvažnim zaprljanjem zidova između 55% - 60%);
- Završna obrada kolovozne površine i refleksiona klasa kolovoza. Kako su podaci o realnim refleksionim karakteristikama kolovoza u praksi retko dostupni, za projekat osvetljenja može biti merodavna neka od teoretskih refleksionih klasa R1 do R4 definisana od stran Međunarodne komisije za osvetljenje CIE. U tabeli 2 opisno je dat sastav površinskog sloja kolovoza prema kome se može odrediti teoretska refleksiona klasa koja će najpribližnije odgovarati kolovoznom pokrivaču unutar tunela.

Osvetljenje 2018

Tabela 2: Opis sastava površinskog sloja kolovoza teoretskih refleksionih klasa R1 do R4

Klasa	Opis	Q ₀	Tip refleksije
R1	Asfaltni putni pokrivač sa najmanje 15% veštačkog materijala za povećanje sjajnosti (Grenette, Lyxovite, Synopal i sl.) ili najmanje 30% jako svetlih anortozita (arcilit, labradorit i sl.). Pokrivači sa kamenom sitneži koja pokriva više od 80% površine kolovoza, pri čemu je kamena sitnež sastavljena od materijala za povećanje sjajnosti ili od 100% veoma sitnih anortozita. Betonska površina.	0,10	Difuzna
R2	Pokrivači sa hrapavom teksturom i normalnim agregatima. Asfaltni pokrivači sa 10 do 15% veštačkog materijala za povećanje sjajnosti. Grub i hrapav asfaltni beton bogat šljunkom (>60%), sa zrnima veličine do ili iznad 10mm. Liveni asfalt neposredno po izvođenju.	0,07	Približno difuzna
R3	Asfaltni beton u hladnom stanju (liveni asfalt) sa šljunkom granulacije do 10mm, ali sa hrapavom teksturom. Pokrivač sa grubom teksturom ali uglačanom.	0,07	Slabo usmerena
R4	Liveni asfalt posle više meseci korišćenja, Pokrivači sa prilično glatkom ili uglačanom teksturom.	0,08	Usmerena

3. PREPORUKE IZ OBLASTI TUNELSKOG OSVETLJENJA

Pri projektovanju osvetljenja tunela najčešće se koriste tehnički izveštaj Evropske komisije za osvetljenje, kod nas objavljen kao SRPS CR 14380 [1] i preporuka Međunarodne komisije za osvetljenje CIE88 [2]. Pored opštih smernica navedenih u tehničkom izveštaju SRPS CR 14380, u aneksima ovog izveštaja su prikazane različite metodologije za određivanje vrednosti ulaznih parametara i zahtevi koje je potrebno ispuniti.

Za razliku od osvetljenja saobraćajnica (gde se u većini Evropskih zemalja primenjuje usaglašeni standard), u oblasti tunelskog osvetljenja zastupljeni su različiti pristupi i kriterijumi koje je potrebno ispuniti, tako da se neke od Evropskih zemalja oslanjaju na sopstvene preporuke i standarde za osvetljenje tunela.

Zahtevi za evakuaciono osvetljenje u slučaju opasnosti i osvetljenje površina kao što su zaustavne niše i poprečni prolazi između tunelskih cevi su definisani u preporuci Međunarodne komisije za osvetljenje CIE 193 [3] i u standardu SRPS EN 16276 [5]. Metodologija proračuna merodavnih parametara je detaljno opisana u preporuci CIE 189 [4].

4. OSVETLJENJE U DNEVNIM USLOVIMA, KARAKTERISTIČNE ZONE TUNELA

Prilikom približavanja ulazu u tunel vozač je tokom dana suočen sa problemom vizuelne adaptacije. Potreban je određeni vremenski interval kako bi se oči vozača prilagodile na naglu promenu sa visokih nivoa dnevnog osvetljenja izvan tunela na nizak nivo unutar tunela (vremenska adaptacija). Drugi problem sa kojim se vozač suočava je problem prostorne adaptacije. Ispred tunelskog portala vidno polje vozača je relativno široko i odgovara konusu od 20°. Kada se vozač približi ulazu u tunel njegovo vidno polje se privremeno sužava i odgovara otvoru tunelskog portala koji je oko 2°.

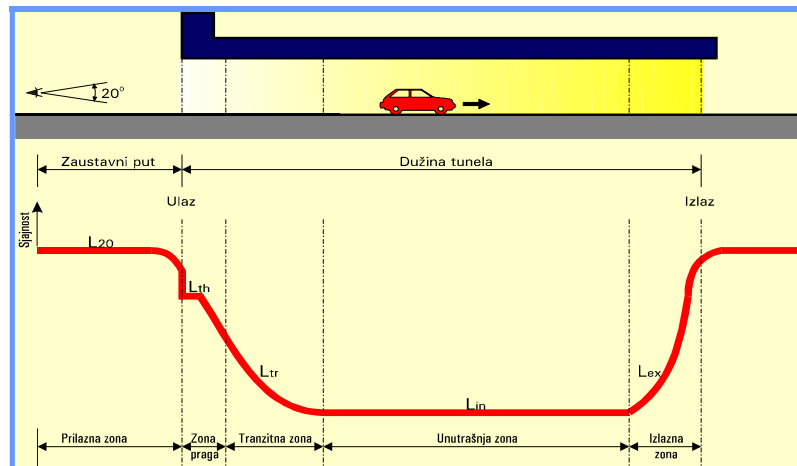
Kada se vozač približava neosvetljenom ili loše osvetljenom tunelu, javlja se fenomen crne rupe koji se ogleda u nemogućnosti vozača da u kratkom vremenskom intervalu i sa rastojanja bliskog zaustavnom putu vidi unutrašnjost tunela.



Slika 2. Efekat crne rupe u loše osvetljenom tunelu

U cilju smanjenja ovog efekta, potrebno je da ulazna zona tunela bude u dovoljnoj dužini adekvatno osvetljena. Iz ekonomskih razloga, nivo sjajnosti se, poštujući određene zakonitosti, postepeno smanjuje od ulaza do unutrašnjosti tunela.

U tunelu se, zbog različitih vidnih zahteva u pojedinim njegovim delovima, definišu karakteristične zone kojima se pridružuje i deo saobraćajnice neposredno ispred ulaza u tunel. Na slici 3 je prikazan uzdužni presek tunela za jednosmerni saobraćaj sa karakterističnim zonama merodavnim za osvetljenje tunela: prilazna zona, zona adaptacije (koju čine zona praga i tranzitna zona), unutrašnja i izlazna zona.



Slika 3. Uzdužni presek i karakteristične zone tunela za jednosmerni saobraćaj

4.1. Prilazna zona

Prilazna zona je deo saobraćajnice neposredno ispred ulaza u tunel čiji je početak udaljen od ulaza u tunel za dužinu zaustavnog puta. Sjajnost prilazne zone se najčešće određuje primenom metode L_{20} i izračunava primenom empirijske formule:

$$L_{20} = \gamma L_C + \rho L_r + \varepsilon L_e \quad (2)$$

u kojoj su γ , ρ , ε redom udeli neba, kolovoza i okruženja u vidnom polju vozača izraženi u procentima, a L_c , L_r , L_e njihove sjajnosti u funkciji smera vožnje (vrednosti koje odgovaraju najnepovoljnijim uslovima sunčanog dana). U tabeli 3 su date referentne vrednosti koje se najčešće koriste, uz napomenu da je potrebno uvažiti i lokalne uslove.

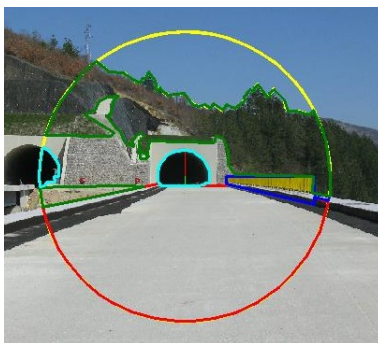
Tabela 3: Tipične vrednosti sjajnosti za određivanje L_{20}

Smer vožnje (severna hemisfera)	L_c (nebo) kcd/m ²	L_r (put) kcd/m ²	L_e (okruženje) kcd/m ²			
			Stene	Objekti	Sneg	Vegetacija
N (sever)	8	3	3	8	15 (V) 15 (H)	2
E-W (istok, zapad)	12	4	2	6	10 (V) 15 (H)	2
S (jug)	16	5	1	4	5 (V) 15 (H)	2

(V) se odnosi na planinsko okruženje sa vertikalnim površinama, a (H) na ravne površine

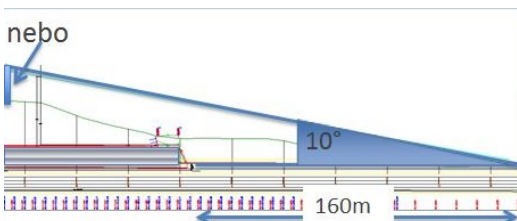
Procentualni udeli u vidnom polju vozača se mogu odrediti na osnovu fotografije tunelskog portala snimljene sa pozicije očiju vozača i udaljenosti koja odgovara dužini zaustavnog puta.

Na slici 4 prikazan je primer određivanja procentualnih udela okruženja za tunel visine 7m sa ograničenjem brzine vožnje 100km/h. Poluprečnik kruga, čiji je centar na $\frac{1}{4}$ visine tunelskog otvora, određen je u funkciji zaustavnog puta SD ($r=SD \cdot \text{tg}10^\circ$). Izračunati udeli okruženja u ovom primeru su: nebo 14,5%; kolovoz 42,6%; vegetacija 25,9%; stene 11,4%; ograda 2,5%; otvor tunela 3,1% .

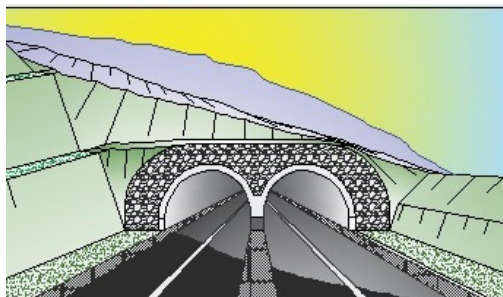


Slika 4. Primer određivanja procentualnih udela okruženja

U slučajevima kada se radi o novim tunelskim cevima koje su u fazi projekta, gruba procena udela okruženja može se izvršiti na osnovu podužnog preseka tunelske cevi. Najpre se proveriti da li sa dužine zaustavnog puta može biti neba u vidnom polju vozača (kao u primeru na slici 5) i proceni udeo neba. Iz iskustva je poznato da se zavisno od brzine vožnje, širine kolovoza i konfiguracije terena, procentualni udeo kolovoza uobičajeno kreće od oko 25% - 30% (za tunele sa ograničenjem brzine vožnje 60km/h) do oko 40% - 45% (za tunele sa ograničenjem brzine 100km/h). Takođe je poželjno da se na osnovu konfiguracije terena izradi perspektivni crtež tunelskog portala sa dužine zaustavnog puta (kao što je prikazano na slici 6), na osnovu koga se mogu detaljnije odrediti udeli okruženja u vidnom polju vozača. Na slici 5 prikazana je grafička procena udela neba za tunel sa ograničenjem brzine vožnje 100km/h sa dužine zaustavnog puta 160m.



Slika 5. Podužni presek tunelske cevi



Slika 6. Perspektivni crtež tunelskih portala

Nivo sjajnosti prilazne zone se stalno menja u zavisnosti od dela dana, godišnjeg doba i meteoroloških prilika. U zavisnosti od izmerenog nivoa sjajnosti prilazne zone L_{20} vrši se podešavanje nivoa sjajnosti unutar zone adaptacije.

4.2. Zona adaptacije

Zonu adaptacije čine zona praga i tranzitna zona. Duž ove zone vrši se vremenska i prostorna adaptacija očiju vozača do nivoa sjajnosti unutrašnje zone. Ukupna dužina zone adaptacije zavisi od brzine vožnje (odnosno dužine zaustavnog puta), izmerene sjajnosti prilazne zone i nivoa sjajnosti unutrašnje zone tunela.

Zona praga je ulazni deo tunela u kome je neophodno ostvariti dovoljno visok nivo sjajnosti koji će vozaču omogućiti da uoči eventualne prepreke u tunelu. Dužina zone praga

jednaka je dužini zaustavnog puta pri projektovanoj brzini. U prvoj polovini zone praga, sjajnost je konstantna (sjajnost zone praga L_{th}) i linearno srazmerna sa nivoom sjajnosti prilazne zone L_{20}

$$L_{th} = k * L_{20} \quad (3)$$

gde je koeficijent k definisan u funkciji brzine, odnosno dužine zaustavnog puta. U drugoj polovini zone praga sjajnost postepeno opada do vrednosti 40% sjajnosti zone praga L_{th} .

Na osnovu preporuke CIE 88 i Aneksa 1 SRPS CR 14380 koeficijent k se određuje u funkciji ograničenja brzine vožnje.

Tabela 4: Vrednost koeficijenta k prema CIE 88 i SRPS CR 14380, Aneks 1

Brzina vožnje (km/h)	$k=L_{th}/L_{20}$
≤ 60	0.05
80	0.06
120	0.1

Za slučaj da je ograničenje brzine između navedenih vrednosti, primenjuje se metoda linearne interpolacije, tako da je u slučaju autoputnih tunela sa ograničenjem brzine 100km/h, vrednost koeficijenta $k=0.08$.

Ukoliko se primenjuje Aneks 2 tehničke preporuke SRPS CR 14380, pored ograničenja brzine, odnosno dužine zaustavnog puta, razmatra se i protok saobraćaja. Na osnovu protoka saobraćaja vrši se izbor klase tunela prema tabelama 5 i 6, a potom i vrednost koeficijenta k u funkciji dužine zaustavnog puta i klase tunela, prema tabeli 7.

Tabela 5: Protok saobraćaja – vršni sat broj vozila po voznoj traci

Protok saobraćaja	Jednosmerni saobraćaj	Dvosmerni saobraćaj
Visok	> 1500	> 400
Srednji	500 - 1500	100 - 400
Nizak	< 500	< 100

Tabela 6: Izbor klase tunela (A – samo motorni saobraćaj, M – mešoviti saobraćaj)

Protok saobraćaja	Visok		Srednji		Nizak	
Tip saobraćaja	M	A	M	A	M	A
Klasa tunela	4	3	3	2	2	1

Tabela 7: Koeficijent k u funkciji klase tunela i dužine zaustavnog puta

Zaustavni put SD (m)	60	100	160
Klasa tunela			
4	0.05	0.06	0.10
3	0.04	0.05	0.07
2	0.03	0.04	0.05
1	bez zahteva (orijentaciono osvetljenje)		

Za izvedene autoputne tunele u našem regionu, na kojima je ograničenje brzine 100km/h, zahtevani ulazni parametri su projektovani u skladu sa metodologijom Aneksa 2 SRPS CR 14380 (tuneli na koridoru Vc u Bosni i Hercegovini i autoputni tuneli na Koridoru 10 i 11 u Srbiji), pri čemu je usvojen stroži uslov za minimalan odnos podužne ujednačenosti sjajnosti od 60%. Primenjene su svetiljke sa LED izvorima svetlosti, a uslovi eksploatacije su pokazali da su obezbeđeni dobri uslovi vidljivosti kako u zoni adaptacije, tako i u unutrašnjoj zoni.

4.3. Tranzitna zona

Tranzitna zona se nadovezuje na zonu praga. U ovoj zoni se nastavlja proces opadanja nivoa sjajnosti od nivoa sjajnosti na kraju zone praga do nivoa sjajnosti unutrašnje zone pomnoženog određenim koeficijentom (u zavisnosti od primenjene preporuke). Praksa je pokazala da je za proces vizuelne adaptacije poželjno da ovaj koeficijent ne bude veći od dva, kako je definisano preporukom Međunarodne komisije za osvetljenje CIE 88.

4.4. Unutrašnja zona

Unutrašnja zona je deo tunela u kome je vid vozača adaptiran na najniži dozvoljeni konstantni nivo sjajnosti u tunelu. Nivo sjajnosti u unutrašnjoj zoni zavisi od dužine zaustavnog puta i gustine saobraćaja. U zavisnosti od primenjene preporuke, zahtevane vrednosti sjajnosti unutrašnje zone se značajno razlikuju. Prema preporuci Međunarodne komisije za osvetljenje CIE 88 vrednosti sjajnosti su izražene i u funkciji dužine tunela. Vrednosti sjajnosti koje je potrebno obezbediti u prvoj unutrašnjoj zoni veoma dugog tunela ili duž čitavog tunela (u zavisnosti od dužine tunela) date su u tabeli 8. Dužina prve unutrašnje zone odgovara dužini koja se od kraja tranzitne zone pređe u intervalu od 30 sekundi.

Tabela 8: Sjajnost unutrašnje zone dugih tunela prema CIE 88

Zaustavni put (m)	DUGI TUNELI Protok saobraćaja	
	Nizak	Visok
160m	6cd/m ²	10cd/m ²
60m	3cd/m ²	6cd/m ²

Uvažavajući činjenicu da je nakon 30 sekundi vožnje duž prve unutrašnje zone izvršena potpuna adaptacija očiju vozača, preporuka CIE 88 definiše niže zahtevane vrednosti sjajnosti u drugoj unutrašnjoj zoni veoma dugih tunela.

Tabela 9: Sjajnost druge unutrašnje zone veoma dugih tunela prema CIE 88

Zaustavni put (m)	VEOMA DUGI TUNELI Protok saobraćaja	
	Nizak	Visok
160m	2.5cd/m ²	4.5cd/m ²
60m	1cd/m ²	2cd/m ²

Tehnička preporuka Evropske komisije za osvetljenje (kod nas objavljena kao SRPS CR 14380) definiše jedinstvene vrednosti sjajnosti unutrašnje zone, nezavisno od dužine tunela. U tabelama 10 i 11 prikazani su zahtevi prema Aneksu 1 i Aneksu 2 ove preporuke.

Tabela 10: Sjajnost unutrašnje zone prema SRPS CR 14380 – Aneks 1

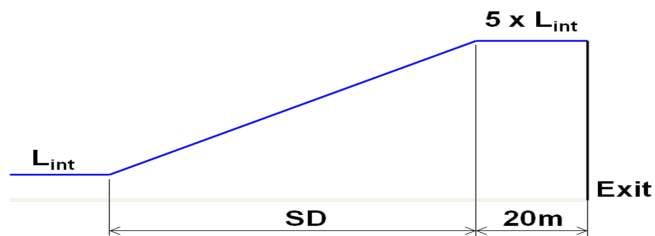
Zaustavni put (m)	Protok saobraćaja		
	Nizak	Srednji	Visok
160m	5cd/m ²	10cd/m ²	15cd/m ²
100m	2cd/m ²	4cd/m ²	6cd/m ²
60m	1cd/m ²	2cd/m ²	3cd/m ²

Tabela 11: Sjajnost unutrašnje zone prema SRPS CR 14380 – Aneks 2

Zaustavni put / klasa tunela	60m	100m	160m
4	3cd/m ²	6cd/m ²	10cd/m ²
3	2cd/m ²	4cd/m ²	6cd/m ²
2	1.5cd/m ²	2cd/m ²	4cd/m ²
1	NZ	0.5cd/m ²	1.5cd/m ²

4.5. Izlazna zona

U izlaznoj zoni tunela adaptacija očiju vozača u dnevnim uslovima se vrši sa nižih nivoa sjajnosti unutrašnje zone na više nivoe sjajnosti izvan tunela. Vreme potrebno za vidnu adaptaciju pri prelasku sa nižih na više nivoe sjajnosti je kratko i obično ne zahteva dodatno povećanje nivoa sjajnosti u izlaznoj zoni. U situacijama kada se očekuju dodatne opasnosti u blizini izlaza iz tunela ili kod veoma dugih tunela, potrebno je da se nivo sjajnosti linearno povećava u dužini koja odgovara dužini zaustavnog puta, tako da se u poslednjih 20m obezbedi pet puta veći nivo sjajnosti od sjajnosti unutrašnje zone.



Slika 7. Šematski prikaz povećanja nivoa sjajnosti u izlaznoj zoni

5. OSTALI FOTOMETRIJSKI ZAHTEVI

Jedan od važnih faktora kvaliteta osvetljenja tunela je **ravnomernost sjajnosti**. Preporuke definišu minimalne vrednosti opšte ujednačenosti sjajnosti kolovoza i zidova i minimalne podužne ravnomernosti sjajnosti kolovoza. Uobičajeni zahtev koji je potrebno ispuniti je opšta ujednačenost sjajnosti kolovoza i zidova ne manje od 40% i podužna ujednačenost sjajnosti kolovoza ne manje od 60%.

U instalaciji osvetljenja tunela svetiljke su najčešće postavljene na manjoj visini, što može da prouzrokuje fiziološko blještanje. Merilo fiziološkog blještanja je **relativni porast praga TI** koji u relevantnim zonama tunela tokom dana i noći ne sme biti veći od 15%. Za dodatno osvetljenu izlaznu zonu nema posebnih ograničenja po pitanju zahteva za ograničenje fiziološkog blještanja.

Svetiljke za osvetljenje unutrašnje zone tunela mogu da budu postavljene u isprekidanom ili neprekidnom nizu. Kada su svetiljke postavljene u isprekidanom nizu, u vidnom polju vozača se pojavljuju svetla i tamna polja koja uzrokuju **efekat treperenja**. Efekat treperenja je zanemarljiv ako je frekvencija treperenja (odnos brzine kretanja vozila i rastojanja između susednih svetiljki) manja od 2.5Hz i veća od 15Hz. Ukoliko je vozač izložen efektu treperenja duže od 20s, frekvencija treperenja mora biti van opsega 4 – 11Hz [2].

Dobro osvetljeni zidovi tunela doprinose adaptaciji i predstavljaju pozadinu ispred koje treba uočiti eventualne prepreke u tunelu. **Nivo sjajnosti zidova tunela** do visine 2m treba da bude veći od određenog procenta srednje sjajnosti kolovoza. Preporuka CIE 88 definiše minimalnu vrednost od 60% nivoa sjajnosti postignutog na kolovozu.

Ukoliko se tunel nalazi na delu osvetljene saobraćajnice, potrebno je da **nivo sjajnosti u tunelu u noćnim satima** bude jednak ili veći od nivoa koji se ima na pristupnom putu. Ukoliko se tunel nalazi na neosvetljenom putu, minimalni nivo sjajnosti unutar tunela treba da bude bar 1 cd/m^2 .

Za slučaj prekida mrežnog napajanja potrebno je obezbediti **sigurnosno osvetljenje**, za nivo srednje pogonske vrednosti osvetljenosti bar 10lx i minimalne osvetljenosti od 2lx.

Osvetljenje **zaustavnih niša** potrebno je predvideti tako da pogonski nivo osvetljenosti na površini niše za prinudno zaustavljanje vozila ne bude manji od tri puta nivoa osvetljenosti na susednom kolovozu (za slučaj da se koristi izvor svetlosti iste temperature boja), ili ne manji od dva puta nivoa osvetljenosti susednog kolovoza za slučaj da se koristi izvor svetlosti različite temperature boja u odnosu na kolovoz (ovaj zahtev je bio uobičajen u slučajevima kada su se za funkcionalno osvetljenje tunela koristile svetiljke sa natrijumovim izvorima visokog pritiska). Indeks reprodukcije boja izvora za osvetljenje zaustavnih niša treba da je $R_a \geq 60$ [3].

Kolske i pešačke poprečne prolaze potrebno je osvetliti tako da srednja pogonska vrednost horizontalne osvetljenosti bude jednaka dnevnom nivou osvetljenosti unutrašnje zone tunela [3].

6. SISTEMI OSVETLJENJA I USLOVI KONTRASTA

Prepreke u tunelu je moguće videti zahvaljujući kontrastu, odnosno razlici sjajnosti prepreke i njene pozadine. U zavisnosti od reflektujućih osobina površina (prepreke i pozadine) i sistema osvetljenja koji se koristi kontrast može biti pozitivan ili negativan. Ako je prepreka svetlija od pozadine (kolovoza) kontrast je pozitivan, i obrnuto ako je prepreka tamnija od pozadine kontrast je negativan [6].

Za osvetljenje ulazne zone tunela uobičajeno se koriste dva sistema osvetljenja: simetrični i asimetrični (sitem kontrafluksa) sistemi osvetljenja. Ovi sistemi osvetljenja su nazvani prema

raspodeli svetlosnog intenziteta svetiljke. Kako bi se postigli dobri uslovi vidljivosti potrebno je ispuniti uslove kontrasta koji su definisani preko koeficijenta kontrasta CRC (contrast revealing coefficient), kao odnosa sjajnosti pozadine prepreke u tunelu i njene vertikalne osvetljenosti.

Kod simetričnog sistema osvetljenja potrebno je obezbediti da posmatrač vidi potencijalnu prepreku u pozitivnom kontrastu, kao svetao objekat u odnosu na tamnu pozadinu. Da bi se ispunili ovi uslovi koeficijent kontrasta ne sme da bude veći od 0.2 ($CRC \leq 0.2$). Kod sistema osvetljenja kontrafluks svetlost je usmerena suprotno smeru vožnje i vozač vidi prepreku kao taman objekat u odnosu na svetlu pozadinu. U ovom slučaju koeficijent kontrasta ne sme da bude manji od 0.6 ($CRC \geq 0.6$).

Primena određenog sistema osvetljenja zavisi od: podloge kolovoznog pokrivača (zbog uslova kontrasta na površinama sa pretežno difuznom refleksijom primenjuje se simetričan sistem osvetljenja, a kod kolovoza sa usmerenom refleksijom kojima odgovaraju teoretske klase kolovoznog pokrivača R3 i R4 može se primeniti i sistem osvetljenja kontrafluks); prodora dnevne svetlosti (kontrafluks sistem osvetljenja nije pogodan za tunele u kojima je veliki prodor dnevne svetlosti); gustine i tipa saobraćaja (u slučajevima kada je gustina saobraćaja velika ili kada se očekuje prisustvo većeg broja visokih vozila, sistem osvetljenja kontrafluks može biti neodgovarajući). Simetričan sistem osvetljenja je neophodno primeniti za osvetljenje kratkih tunela sa dvosmernim saobraćajem u kojima se zone adaptacije oba ulaza međusobno prepliću (tuneli u kojima praktično nema unutrašnje zone).

7. SAVREMENI TREND OVI

Razvoj i stalna unapređenja svetiljki sa LED izvorima svetlosti omogućio je njihovu primenu i u oblasti osvetljenja tunela. LED izvore karakteriše dug životni vek i trenutni odziv, što ih čini veoma pogodnim za primenu u tunelima, u kojima je regulacija svetlosnog fluksa veoma značajna. Dug životni vek ovih izvora smanjuje troškove održavanja, koje je inače otežano u tunelu. Savremeni sistemi za upravljanje i monitoring rada instalacije tunelskog osvetljenja koji omogućavaju upravljanje svakom pojedinačnom svetiljkom i prikupljanje povratnih informacija o njenom statusu (dvosmerna komunikacija sa pouzdanom serijskom komunikacijom velike prenosne moći), omogućavaju jednostavnu realizaciju velikog broja režima rada, čime se mogu postići dodatne uštede u potrošnji električne energije. Preporučuju se robusni sistemi upravljanja koji su podesni za primenu u otežanim uslovima rada u tunelu, kao i komunikacija sa svakom pojedinačnom svetiljkom a ne samo sa grupom ili svim svetiljkama istovremeno ("broadcast"). Pored uobičajenih režima rada koji su posledica promene sjajnosti prilazne zone, savremeni kontrolni sistemi omogućavaju i realizaciju režima rada koji su posledica brzine kretanja na saobraćajnici ispred i u samom tunelu.

8. ZAKLJUČAK

Instalacija osvetljenja u tunelu mora da omogući bezbedno i sigurno kretanje učesnika u saobraćaju, kako u dnevnim tako i u noćnim uslovima. To je kompleksan zadatak u kome je potrebno voditi računa o velikom broju zahteva koje je potrebno ispuniti.

Zbog prednosti sa aspekta održavanja, trenutnog odziva, smanjenja potrošnje energije i mogućnosti kontinualne regulacije svetlosnog fluksa, primena svetiljki sa LED tehnologijom postala je standard u osvetljenju tunela.

LITERATURA

- [1] SRPS CR 14380:2012 "Primena osvetljenja – Osvetljenje tunela"
- [2] CIE 88: 2004 "Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses",
- [3] CIE 193:2010 "Emergency Lighting in Road Tunnels"
- [4] CIE 189:2010 "Calculation of Tunnel Lighting Quality Criteria"
- [5] SRPS EN 16276: 2013 "Evakuaciono osvetljenje u tunelima"
- [6] M. Kostić, "Vodič kroz svet tehnike osvetljenja, Minel-Schröder", 2000