

**Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet Podgorica**

Dipl. ing. Vladimir Radulović

**Primjena led izvora svjetlosti i savremenih sistema upravljanja
rasvjetom za osvjetljenje tunela**

-Magistarski rad-

Podgorica, oktobar 2022.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANTU

Ime i prezime: Vladimir Radulović

Datum i mjesto rođenja: 02.10.1965., Nikšić, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Elektrotehnički fakultet – smjer elektronika, 1991.

Naziv završenog specijalističkog studijskog programa: Magistarske studije na Elektrotehničkom fakultetu – smjer Automatika. 2023.

Magistrant je položio sve ispite koji su predviđeni planom i programom, to jeste:

Upravljanje EMP naizmjenične struje,	ocjena B (vrlodobar)
Upravljanje EMP JSS,	ocjena B (vrlodobar)
Upravljanje procesima (napredni kurs)	ocjena B (vrlodobar)

Bibliografija

Vladimir Radulović, Milovan Radulović, „LED rasvjeta tunela, primjer tunel Budoš na putu Podgorica – Nikšić“, IT 2017, Žabljak [2]

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU:

Naziv postdiplomskih studija: Elektrotehnički fakultet – smjer Automatika

Naziv rada:

„Primjena led izvora svjetla i savremenih sistema upravljanja rasvjetom za osvjetljenje tunela“.

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet u Podgorici

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGITERSKOG RADA:

Datum prijave magistarskog rada: 24.05.2017.. godine

Datum sjednice vijeća na kojoj je prihvaćena tema rada: 06.09.2017. godine

Komisija za ocjenu teme i podrobnosti magistranda:

Prof. dr Božo Krstajić, predsjednik

Prof. dr Milovan Radulović, mentor

Doc. dr Žarko Zečević, član

Mentor: Prof. dr Milovan Radulović

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Božo Krstajić, predsjednik

Prof. dr Milovan Radulović, mentor

Doc. dr Žarko Zečević, član

Komisija za odbranuu rada:

Prof. dr Božo Krstajić, predsjednik

Prof. dr Milovan Radulović, mentor

Doc. dr Žarko Zečević, član

Datum odbrane:

Datum promocije:

Ime i prezime autora: Vladimir Radulović

E T I Č K A I Z J A V A

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

"Primjena led izvora svjetlosti i savremenih sistema upravljanja rasvjetom za osvjetljenje tunela"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Vladimir Radulović

U Podgorici, dana 17.10.2023. godine

SADRŽAJ

LISTA OZNAKA KORIŠĆENIH U RADU.....	5
Predgovor.....	7
Rezime.....	8
Abstrakt.....	9
1. UVOD	10
1.1 Svrha i cilj istraživanja.....	10
1.2 Organizacija magistarskog rada	10
1.3 Hipoteza sa obrazloženjem	10
1.4 Uopšteno o tunelima	10
1.5 Podjela tunela i uopšteno o rasvjeti tunela	12
1.6 Osvjetljenje tunela	14
1.7 Osnovne smjernice za projektovanje tunelske rasvjete	15
1.8 Podjela tunela na zone osvjetljenja	16
1.9 Određivanje parametara kod vizuelnog i prostornog prilagođavanja.....	22
2. Analiza kriterijuma kvaliteta tunelske rasvjete	26
2.1 L20 METHOD – preporuka CIE 88.....	26
2.2 Sistemi osvjetljenja tunela	31
2.2.1 Izbor sistema osvjetljenja tunela	31
2.2.2 Ravnomjernost sjajnosti u tunelu.....	33
2.2.3 Ograničenje bliještanja u tunelu	34
2.2.4 Fenomen treperenja	34
2.2.5 Osvjetljenje tunela u noćnim satima.....	35
2.2.6 Vizuelno (optičko) vođenje	35
2.2.7 Ostale svjetlotehničke smjernice za osvjetljenje tunela	35
2.3. Primjena LED izvora svjetlosti u tunelskom osvjetljenju	37
3. Primjena LED tehnologije i savremeni sistemi upravljanja rasvjetom – mogućnost uštede u poređenju sa konvencionalnim sistemima.....	38
3.1 Osnovne karakteristike LED izvora svjetlosti	39
3.2 Prednosti postignute upotrebom LED prema upotrebi HID izvora svjetlosti.....	43

3.3	Arhitektura i pregled osnovnih tipova tunelskih sistema za upravljanje rasvjetom.....	46
3.4	1) Autonomna kontrola bez komunikacije.....	49
3.4	2) Osnovna kontrola sa jednosmjernom komunikacijom	50
3.4	3) Napredna kontrola sa mogućnošću pametne integracije	52
3.5	Sistem daljinskog upravljanja i nadzora	59
3.6	SCADA sistem daljinskog upravljanja i nadzora	61
3.7	Primjer tunelskog kontrolnog sistema	62
3.7.1	Sistem sa osnovnom kontrolom upravljanja.....	63
3.7.2	Napredni sistem upravljanja	64
4.	Studija slučaja.....	65
4.1	Tunel Budoš	65
4.2	Novo projektno rjesenje tunela "Budoš"	67
4.3	Osvjetljenje prilaznih dionica puta tunela "Budoš"	67
4.4	Osvjetljenje unutrašnjosti tunela "Budoš"	68
4.4.1	Kategorizacija tunela.....	68
4.4.2	Podjela tunela na zone osvjetljenja	68
4.4.3	Određivanje zaustavnog puta vozila.....	68
4.4.4	Određivanje veličine nivoa sjajnosti prilazne zone.....	68
4.4.5	Određivanje veličine L_{th} - nivoa sjajnosti zone praga	69
4.4.6	L_{th} – izračunavanje nivoa sjajnosti prelazne zone.....	70
4.4.7	L_{in} – određivanje nivoa sjajnosti unutrašnje zone.....	70
4.4.8	Odredjivanje nivoa sigurnosnog osvjetljenja.....	70
4.5	Svetiljke koje su instalisane u unutrašnjosti tunela "BUDOŠ"	70
4.6	Režimi rada instalacije osvjetljenja u tunelu	71
4.7	Upravljanje osvjetljenjem tunela	71
4.8	Napojni vodovi svjetiljki	72
5.	ZAKLJUČAK	73
	Literatura.....	75

LISTA OZNAKA KORIŠĆENIH U RADU

- SD - (Stopping Distance) Dužina zaustavnog puta
- U – Brzina vožnje
- g - Gravitaciono ubrzanje
- t_0 - Vrijeme reakcije
- f - Koeficijent trenja
- L_{20} - Nivo sjajnosti prilazne zone
- CIE - Međunarodna komisija za osvjetljenje
- CEN - Evropski komitet za standardizaciju
- L_C - Sjajnost neba
- γ - Procenat neba u vidnom polju vozača
- L_R - Sjajnost puta
- ρ - Procenat puta u vidnom polju vozača
- ε - Procenat okruženja u vidnom polju vozača
- L_E - Sjajnost okruženja
- L_{th} - Sjajnost na ulazu u tunel
- L_{seq} - Ekvivalentna sektorska sjajnost
- τ - Procenat ulaza u tunel u vidnom polju vozača
- V – Vertikalne površine
- H – Horizontalne površine
- L_{in} - Sjajnost unutrašnje zone
- T – Temperatura
- R – Otpornost
- P – Snaga
- LED – Light-emitting diode (svjetleća dioda)
- PLC – Power Line Communication (PLC kontroler)
- L_n – Linija strujnog kruga (n -broj strujnog kruga)
- DALI protokol – Digital Addressable Lighting Interface (digitalni komunikacijski protokol)
- DMX protocol - The Digital Multiplex (DMX) protocol

- BUS - Komunikacioni protokol
- RS-485 - Serijska komunikacija
- COKP - Centar za održavanje i kontrolu protoka vozila
- BTS - BasicTunnelSystem – osnovni sistem upravljanja instalacijom, osvjetljenja u tunelu tunelu
- ATS - AdvancedTunnelSystem - napredni sistem upravljanja instalacijom osvjetljenja u tunelu
- TS - Trafo stanica
- P_{in} - Instalirana snaga
- UPS – Uređaj neprekidnog napajanja
- f_p – Faktor prigušenja
- f_{pm} - Faktor prigušenja magla
- f_{pk} - Faktor prigušenja kiša
- f_{po} - Faktor prigušenja oblak
- f_{ps} - Faktor prigušenja snijeg
- ES - Ekspertni sistem
- SDUN - Sistem daljinskog upravljanja i nadzora
- C - Kontrast
- L - Sjajnost
- DS - Daljinske stanice
- SDU - Sistem daljinskog upravljanja
- SCADA - (Supervisory Control And Data Acquisition) Nadzorna kontrola i prikupljanje podataka

Predgovor

Naziv magistarskog rada je „Primjena led izvora svjetla i savremenih sistema upravljanja rasvjetom za osvjetljenje tunela“.

Rad obrađuje primjenu savremenih tehnika u projektovanju i izvođenju sistema osvjetljenja tunela za drumski saobraćaj. U radu će biti prikazana sistematizacija i analiza naučnih i stručnih rješenja iz oblasti osvjetljenja tunela.

Led tehnologija se počela koristiti u rasvjeti 1990. godine za putne znakove i putokaze. Ubrzanim razvojem led tehnologija u oblasti rasvjete, poboljšanje njihovih karakteristika i pad cijena, doprinose da su savremene led svetiljke na dobrom putu da preuzmu dominantnu ulogu u javnoj rasvjeti, samim tim u potpunosti i isključe iz upotrebe svetiljke bazirane na živi ili natrijumu. Sa radnim vijekom koji se kreće između deset i petnaest godina, a koji je najmanje tri puta duži od svetiljki u dosadašnjim tehnologijama, sami troškovi održavanja daju i daće veliku prednost led tehnologiji.

Primjenom led izvora svjetlosti omogućava se realizacija savremenih upravljačkih algoritama za regulaciju nivoa osvjetljenosti. Automatizacijom sistema rasvjete, postiže se veći nivo uštede energije samog sistema. Ostvarujući zahtijevani nivo rasvjete, u posmatranom tipu objekta, omogućiti će se i bolje vizuelne (fotometrijske) karakteristike tunelske rasvjete.

Rezime

U današnje vrijeme su aktualna pitanja vezana za metode savremenog projektovanja putne infrastrukture. Predmet istraživanja predstavlja sistem rasvjete u drumskim tunelima. Tunelsko osvjetljenje se javlja kao jedan od najvažnijih činioca sa aspekta bezbjedne vožnje autoputevima. Dosadašnja statistika pokazuje da se na osvjetljenje troši približno 30% električne energije od kumulativno utrošene električne energije za sve tunelske sisteme (elektromašinske, električne, bezbjedonosne). U radu se obrađuju aktualna pitanja vezana za metode savremenog projektovanja putne infrastrukture. Analizirani su savremeni sistemi upravljanja led rasvjetom u drumskim tunelima.

Sa aspekta iznalaženja energetski efikasnih rješenja, zadržavajući bezbjednost upotrebe tunela kao dijela putne infrastrukture, posebno pitanje predstavlja obezbjeđenje što boljih vizuelnih uslova u prilaznoj zoni i unutrašnjosti tunela. Korišćenje LED tehnologije u savremenim sistemima upravljanja rasvjetom obrađena je kroz osnovne tipove i arhitekture tunelskih kontrolnih sistema – autonomnu kontrolu bez komunikacije, osnovnu kontrolu sa jednosmjernom komunikacijom i naprednu kontrolu sa mogućnošću pametne integracije. U tom kontekstu analizirana je studija slučaja tunela „Budoš“. Primjenom analize kriterijuma kvaliteta tunelske rasvjete obrađene kroz L20 METHOD – preporuka CIE 88. obezbijedili su se kvalitetni uslovi za bezbjedno odvijanje saobraćaja.

Studija slučaja obrađuje potpuno novo projektno rješenje osvjetljenja tunela. Glavni projekat rekonstrukcije instalacije osvjetljenja tunela „Budoš“ urađen je zbog izmjene dotrajale postojeće instalacije osvjetljenja koja je vremenom izgubila svoju pravu funkciju i njeno investiciono održavanje. Troškovi koji se javljaju usled korišćenja električne energije aktuelizuju primjenu energetski efikasnijih led izvora svjetlosti. U današnjem trenutku cijena LED na tržištu opada, istovremeno njihova energetska iskoristivost raste, a upravljivost izvora svjetla ovog tipa je mnogo jednostavnija nego kod konvencionalnih izvora svjetla. Ako uvedemo LED tehnologiju kao osnovnu u instalacijama osvjetljenja tunela i ako napravimo i podesimo dobro upravljanje njegovom rasvjetom u svakom terenu, pojaviće se veoma značajna ušteda u potrošnji električne energije. Ona može ići čak do trideset posto u odnosu na postojeću potrošnju.

Ključne riječi: svjetleće diode, sjajnost, upravljanje rasvjetom, kontrola, protokol.

Abstrakt

At present time, issues related to modern road infrastructure design methods are of great importance. The research subject focuses on the illumination system in road tunnels. Tunnel illumination is one of the most significant factors for safe driving on highways. Studies show that illumination accounts for approximately 30% of the total energy consumption of all tunnel systems (electromechanical, electrical, and safety systems). This paper addresses current issues related to modern road infrastructure design methods. Modern LED illumination management systems in road tunnels are analyzed.

From the perspective of finding energy-efficient solutions while maintaining tunnel safety as part of the road infrastructure, providing optimal visual conditions in the entrance zone and interior of the tunnel is a particularly important issue. The application of LED technology and modern illumination management systems is discussed through basic types and architectures of tunnel control systems, including autonomous control without communication, basic control with one-way communication, and advanced control with smart integration capabilities. In this context, a case study of the "Budoš" tunnel is analyzed. By applying the criteria analysis of tunnel illumination quality, based on the L20 method - CIE 88 recommendation, quality conditions for safe traffic flow are ensured.

The case study examines a completely new design solution for tunnel illumination. The main reconstruction project of the "Budoš" tunnel illumination installation was carried out due to the replacement of the decayed existing illumination system, which had lost its proper function over time and required significant investment in maintenance. The current energy consumption calls for the use of energy-efficient LED light sources compared to previously applied ones. At present, the price of LED light sources in the market is decreasing, while their energy efficiency is increasing, and the controllability of this type of light source is much simpler than conventional light sources. This will lead to a global reduction in electricity consumption by 10%, which is a significant saving that can be further increased up to 30% by utilizing sensors and appropriate illumination management.

Keywords: light-emitting diodes, brightness, illumination management, control, protocol.

1. UVOD

1.1 Svrha i cilj istraživanja

Magistarski rad ima za svrhu izučavanje i sistematizaciju postupka projektovanja efikasnih sistema rasvjete tunela na saobraćajnicama i analizu pratećih upravljačkih sistema. Cilj je sistematizacija naučnih i stručnih rezultata i postojećih rješenja sa mogućnošću primjene u praksi projektovanja tunelske rasvjete na putnoj infrastrukturi. Svrha i cilj istraživanja predstavlja predlaganje što kvalitetnijih rješenja u projektovanju i izvođenju sistema tunelske rasvjete, koji se mogu primjeniti u realizaciji infrastrukturnih objekata u neposrednom okruženju.

1.2 Organizacija magistarskog rada

Magistarski rad će biti organizovan na sledeći način:

1. Nakon uvodnih razmatranja u prvom poglavlju biće dat pregled oblasti, definicija i opis osnovnih pojmova o tunelskom osvjetljenju. Aktuelnost teme i pregled dosadašnjih rezultata u realizaciji sistema rasvjete u tunelima za drumski saobraćaj, obradiće se u okviru prvog poglavlja.
2. U narednom poglavlju biće analizirani kritirrijumi kvaliteta tunelske rasvjete i opisane osnovne smjernice za projektovanje uz primjenu aktuelnih propisa i standarda.
3. Nakon toga će se, u narednim poglavljima, obraditi primjena led izvora svjetlosti i savremenih sistema upravljanja rasvjetom u tunelima, a zatim će se, kao takvo, dati poređenje prema već postojećim rješenjima.
4. Posebna cjelina će biti posvećena studiji slučaja – osvjetljenju tunela Budoš, na magistralnom putu Podgorica – Nikšić. U ovom dijelu će se na konkretnom primjeru iz okruženja pokazati nivo energetske uštede i poboljšanja vizuelnih uslova za vozače.
5. Na kraju će biti dati poglavlje sa zaključkom.

1.3 Hipoteza sa obrazloženjem

Hipoteza ovog istraživanja je prikazati primjenu led tehnike rasvjete u drumskim tunelima koja ostvaruje kvalitetniji nivo vizuelnih uslova vožnje, čime se znatno podiže nivo bezbjednosti. Sa aspekta troškova LED je su energetski efikasniji izvori u poređenju sa dosada korišćenim natrijumovim sijalicama visokog pritiska (NVP), metalhalogenim sijalicama (MH) i natrijumovim sijalicama niskog pritiska (NLP). Primjena led izvora svjetlosti omogućava upotrebu široke lepeze inteligentnih upravljačkih algoritama. Troškovi održavanja i radni vijek, sa uporedbom prema korišćenim klasičnim sistemima, daju prednost LED tehnici rasvjete.

1.4 Uopšteno o tunelima

Ljudi od svog nastanka pa do današnjeg trenutka pokušavaju da pobijede i prilagode prirodu svojim potrebama, koliko je god to moguće. Još u davnim vremenima, drevne civilizacije počele su izgradnju prvih tunela. Od tih dana pa sve do danas tuneli predstavljaju jednu od najbitnijih i najsloženijih građevina.

Smatra se da je prvi tunel izgrađen u Babilonu, i to negdje, između 2180. – 2160. godine p.n.ere. To je bio prolaz za pješake dug 3000 feet (900 m). Izgrađen je između rijeke Eufrat, a spajao je Hram boga sunca sa carskom palatom.

U starom Rimu napravljena je široka mreža tunela. Rimljani su pravili vodovode, na osnovu prirodnog pada, i tako doveli, čistu, izvorsku vodu sa planina u gradove i sela. Takođe, oni su pravili i tunnelske sisteme za odvod nečistih voda.

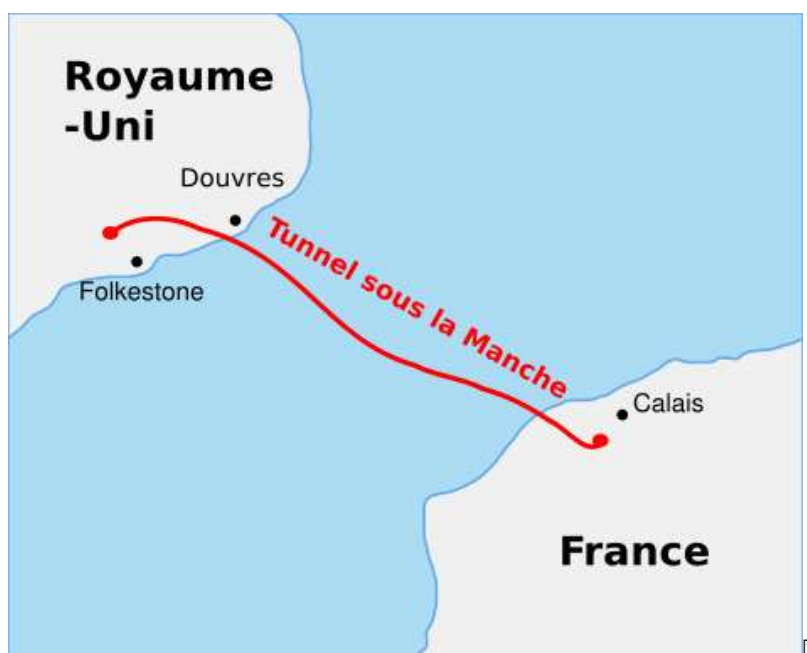
U 17. vijeku počinju se konstruisati i graditi prvi tuneli kanalskog tipa. U nedostatku puteva i željeznica, najbolji način za prevazilaženje velikih rastojanja i transport sirovina od unutrašnjosti do gradova, bili su vodeni putevi (Slika 1).



Slika 1. Canal tunnel Manchester, England [1]

U 19-tom i 20-tom vijeku dolazi do pronalaska i razvoja željeznice i motornih vozila. To prouzrokuje i izgradnju većih, boljih i dužih tunela.

Danas tuneli predstavljaju nezaobilazne objekte prilikom gradnje putne infrastrukture. Tuneli se grade na mjestima gdje treba da savladamo neke prirodne prepreke i skratimo dužinu projektovanog puta. Često ispod velikih, teško prolaznih, planina izgrađujemo duge tunele. U velikim gradovima i industrijskim zonama, saobraćaj bi praktično bio nemoguć bez tunela koji smanjuju i rasterećuju gužve. Takođe, tunelima povezujemo i djelove kopna koji su razdvojeni vodenim površinama, tj. rijekama, jezerima, morima. Najbolji primjer jednog takvog tunela je željeznički tunel La Manche, izgrađen 1994. godine, koji povezuje Francusku sa Velikom Britanijom a dug je 50450m (Slika 2).



Slika 2. Tunel La Manche [1]

Tuneli koji služe za povezivanje kopna, razdvojenog vodenom površinom, grade se na dva načina. Prvi je klasični, gradi se probijanjem zemlje ispod dna vodene površine. Drugi način realizacije je potopljeni tunel. Znači, isti se nalazi skroz u vodenom okruženju, ali u zoni na koju nemaju veliki uticaj površinska strujanja (talasi, plima, osjeka i td.)

Najduži tako realizovan tunel za motorna vozila je Laerdal-Aurland tunel izgrađen 2000. godine u Norveškoj. Dug je 24510m. On čini dio dionice puta Oslo Bergen i povezuje dva mjesta Leardal i Aurland.

1.5 Podjela tunela i uopšteno o rasvjeti tunela

Ne postoji neka stalna, tačno određena, opšte prihvaćena, podjela tunela. Moguće je napraviti klasifikaciju saobraćajnih tunela na osnovu nekog od sledećih kriterijuma:

I) vrste saobraćaja

- putni, drumski,
- željeznički,
- brodski,
- metroi – poszemna željeznica,
- pješački.

II) broja tunelskih cijevi

- jednocijevni tunele (saobraćaj se odvija u dva smjera),
- dvocijevni tuneli (saobraćaj se odvija u jednom smjeru),
- višecijevni tuneli (kombinacija drumskog i željzničkog saobraćaja).

III) dužine tunela

- kratki tuneli - dužina tunelske cijevi manje od 500 metara,
- srednji tuneli - dužina tunelske cijevi je između 500 i 2000 metara,
- dugi tuneli – dužina tunelske cijevi je preko 2000 metara, a manje od 4000 metara,
- vrlo dugi tuneli – dužina tunelske cijevi je preko 4000 metara.

IV) lokacije tunela, mjesta gdje se nalazi tunel

- planinski,
- podvodni,
- urbani.

V) načina izgradnje

Tuneli se prokopavaju kroz različite vrste materijala, od potpuno mekih do tvrdih, stjenovitih, tako da od toga zavisi i vrsta iskopa:

- ukopani tuneli su prosti tuneli, gdje je prokop izbušen, a svod tunela pokriven;
- podzemni tuneli su , najčešće planinski tuneli, sa klasičnim prokopom tunelskih cijevi kroz čvrsto tlo;
- podvodni tuneli mogu biti izvedeni na dva načina:

-tuneli koji leže na vodenom dnu (njihovi segmenti se potapaju u vodu i spajaju na mjestu gdje je tunel predviđen) i

- tuneli koji plutaju (oni lebde u vodi), sastoje se od tunelskih cijevi koje se potapaju i spajaju u vodi na dubini od 30-ak metara, gdje nemaju visokog uticaja vodena strujanja.

Tuneli su važan dio saobraćajne mreže autoputa. Skoro na svakoj dužoj dionici autoputa tunel se javlja jednim dijelom njegove cjeline. Vožnja kroz tunel ne smije da predstavlja bilo kakav zamor ili da stvori neki vid nesigurnosti vozaču kao učesniku u saobraćaju u bilo kom trenutku. Na svakoj takvoj dionici autoputa postavljeni su znaci obavještenja, odgovarajuća svjetlosna signalizacija, kontrolni uređaji. Kroz sam tunel se postavlja razna elektronska oprema koja obezbjeđuje comfort učesnicima u saobraćaju i čak stvara osjećaj zadovoljstva pri prolasku kroz tunel.

Ako sve ove uređaje i opremu, na neki način, elektroni povežemo između sebe i odvedemo informaciju do nekog mjesta nedaleko od tunela stvorimo uslove za mogućnost centralizovanog upravljanja svim ovim uređajima i opremom. Za to nam je, bilo za operatera ili za samu ugradnju ove jedne cjeline u neki složeni sistem, neophodna dodatna oprema u samom kontrolnom centru. Da bi upravljanje i kontrola bili na visokom nivou bira se odgovarajuća efikasna mreža za komunikaciju.

Sam tunel, posmatrajući ga sa strane građevinske konstrukcije, u sebi sadrži i zaustavne niše za automobile, niše za montažu elektromašinske opreme, izlaze za napuštanje tunela u vanrednim uslovima. Zbog toga posebno osvjetljavamo samu trasu puta kroz tunel, uključujući prilazni i izlazni dio. U slučaju pojave nestanka električne energije obezbjeđujemo rad sigurnosnog osvjetljenja korišćenjem nekog od izvora rezervnog napajanja.

Posebno osvjetljavamo tunelske niše, postavljamo svjetiljke za evakuaciju i vizuelno vođenje, ukazujemo na smjer kretanja u havariskim uslovima. Svetiljke za slučaj havarije se montiraju na svakih 25 metara.

Kolovozne trake su, u dijelu koje se graniče sa trotoarom, u tunelu označene oznakama za smjer kretanja. Crvene boje su svjetiljke u smjeru kretanja vozila, bijele na suprotnij strani. Pokrivene su rezervnim napajanjem u slučaju ispada osnovnog.

Radi lakše orijentacije za položaj vozila u tunelu postavljaju se svjetiljke koje određuju razmak između vozila. Postavljaju se na zidu sa desne strane tunelske cijevi, gledajući iz smjera vožnje, na visini 1m od površine puta. Razmak između njih je 50m. Boja svijetla je plava.

Odlazne zone tunela potrebno je osvjetliti svjetilkama koje su za spoljnu rasvjetu. Montiraju se na stubovima vanjske rasvjete.

1.6 Osvjetljenje tunela

Osnovna namjena javnog osvjetljenja je postići optimalno svjetlotehničko i ekonomsko rješenje. Pri tome, osvjetljenje tunela treba projektovati i planirati tako da se zadovolje urbanistički i saobraćajno-tehnički zahtjevi. Postoje dva tipa, tj. dva principa projektovanja:

- projektovanje na osnovu sjajnosti,
- projektovanje na osnovu osvjtljaja.

Princip projektovanja na osnovu sjajnosti upotrebljava se tamo gdje svjetlo-tehnički kriterijumi proizilaze iz uslova vožnje koje određuju sledeći faktori kvaliteta: nivo sjajnosti, ravnomjernost sjajnosti, ograničenje bliještanja i treperenja i vizuelno vođenje. Ovaj princip se upotrebljava pri

- projektovanju puteva,
- projektovanju tunela.

Drumski prevoz igra veoma važnu ulogu u svakodnevnom životu. U cilju obezbjeđenja sigurnosti saobraćaja obavezno je da put, zavisno od njegove kategorije, ispunjava uslove definisane odgovarajućim standardima. Kao jedan od važnih segmanata kompleksnih saobraćajnica ističe se pitanje veoma zahtjevnog putnog objekta kao što je tunel.

Osvjetljenje tunela se bitno razlikuje od osvjetljenja puteva i predstavlja veoma složen i zahtijevan zadatak. Učesnici u saobraćaju, naročito vozači, prilikom ulaska u tunel i prilikom izlaska iz tunela, imaju problem i potrebu za adaptacijom svog vida (kontrast u osvjtljenju, naročito u dnevnim uslovima). Da bi se izbjegao, tj. riješio ovaj problem, tuneli se osvjtljavaju. Ako se ovi zahtjevi pravilno postave i korektno realizuju obezbjeđiće se vizualne performanse vozača na prihvatljivom nivou za bezbjedan prolazak kroz tunel.

Tunelsku rasvjetu treba isprojektovati tako da ona obezbjedi takav nivo i kvalitet osvjtljenja za bezbjednu vožnju. Ona omogućava vozačima da se, ne narušavajući njihovu koncentraciju ili sigurnost prilikom vožnje kroz tunel, njihov vid adaptira na prelazak iz vanjske u unutrašnju sjajnost površine saobraćajne trake i osvjtljenosti.

Realizacija različitih nivoa osvjtljenosti tokom dana i noći predstavlja poseban problem koji iziskuje upotrebu savremenih sistema automatske regulacije. Osvjetljenja tunela tokom noći je relativno prost zadatak. Dnevno osvjtljenje tunela se mora analizirati mnogo kompleksnije. Tokom noći je održava se nivo rasvjete koji omogućava, prilikom vožnje, kako u prilaznom dijelu, tako dijelu zone unutar tunela, adekvatno praćenje rute. Ispunjavaju se uslove definisani standardima za različite kategorije saobraćajnica, kao i drugih svjetlotehničkih veličina, osim sjajnosti saobraćajne trake. Promjena uslova prouzrokovanih geografskom orijentacijom, meteo situacijom i topologijom zemljišta na ulaznim ili izlaznim portalima tunela zahtijeva posebnu pažnju pri analizi i projektovanju rasvjete prilaznim saobraćajnicama i pojedinim zonama unutar tunela [4].

Sigurnost saobraćaja na autoputevima uslovljena je kvalitetnom rasvjetom najkritičnijih objekata, tunela. Kontinualno održavanje tunela od strane službe eksploatacije je veoma složeno. Pri tome su tu i različiti vremenski uslovi. Sve to zahtijeva ispravnost u funkcionisanju rasvjete. Zato je neophodno projektovanjem i izvedbom rasvjete svesti na minimum mogućnost pojave greške i neplanirane situacije.

Osnovni ciljevi tunelske rasvjete su:

- Primarni cilj, kojim se obezbjeđuje vozačev bezbijedan ulazak u prvu zonu tunela, vožnju kroz unutrašnjost tunela i nesmetan izlazak iz tunela,
- Sekundarni cilj, čiji je zadatak da omogući, u svakom trenutku, ostvarenje primarnog cilja ne zavisno od obima saobraćaja.

U cilju ispunjenja ovih uslova projektuje se i bira takva tunelska rasvjeta koja će obezbjediti brzu adaptaciju vida vozača prilikom ulaska i dalje vožnje kroz tunel. Prilikom vožnje moraju biti ispunjeni uslovi za uočavanje eventualnih prepreka na putu. Učesnicima u saobraćaju se obezbjeđuje nesmetan prolaz kroz tunel bez smanjenja njihove brzine kretanja.

Danju, kada imamo veliki kontrast pri prelasku iz niskog nivoa osvijetljenja u tunelu na visoki nivo osvijetljenja vani, ovi uslovi se ispoljavaju na jedan način. Noću je zastupljen inverzni režim u odnosu na dnevne uslove, i tada se ovi uslovi i zahtjevi ispoljavaju na drugi način.

Projektant je dužan da uzme u obzir sve faktore koje utiču na vozačevu vidljivost. Mora vidjeti sam položaj tunela, njegovu izvedbu. Vodi računa o dijelu trase autoputa na kojem se tunel nalazi. Vodi računa o dužini tunela, gustini saobraćaja na predmetnoj dionici. Zavisno od načina izvedbe i zakrivljenosti kolovozne trake, materijala koji je korišćen u izgradnji, učitavajući nagib puta i poštujući vremenske uslove ograničava se brzina vožnje kroz tunel.

Poštijući ova ograničenja vozač se bezbijedno kreće kroz tunel. Zahvaljujući adekvatnoj rasvjeti vozačevo oko se prilagodilo na promjenu nivoa sjajnosti sa sjajnosti ispred samog ulata u tunel na nivo sjajnosti u tunelu. U toj, kritičnoj za njega, dionici puta omogućeno mu je pravovremeno uočavanje bilo kakve prepreke na putu. Poštovanje podužnog praćenja nivoa sjajnosti kolovozne trake i zidova tunela, nivo osvijetljenja ceste, pravilan raspored svjetiljki za vizuelno vođenje, omogućiti će vozaču bezbijedno kretanje kroz tunel.

1.7 Osnovne smjernice za projektovanje tunelske rasvjete

Sa stanovišta vidnih uslova tunel je svaki oblik pokrivenog dijela saobraćajnice. Pri tome ne igra uloga dužina i način pokrivenosti saobraćajnice u dijelu koji je na neki način zaklanjen od dnevne svjetlosti.

Dugim tunelom u svjetlotehničkom pogledu podrazumijeva se svaki tunel čiji se svijetli izlaz iz tunelske cijevi ne vidi ni sa jednog položaja kad stojimo bilo gdje ispred tunela i gledamo unutra dužinom tunelske cijevi.

Principi osvijetljenja tunela se u potpunosti razlikuju od doba dana (noćni i dnevni uslovi).

Noću se tunel može smatrati kao sastavni dio saobraćajnice. Tada se projektu osvijetljenja pristupa kao da se radi i o svim ostalim putevima na otvorenom koji zajedno čine jednu cjelinu.

Projektovanje rasvjete tunela mnogo je kompleksnije za dnevne uslove. Tada se moraju uzimati u obzir svi mogući faktori koji utiču na vozačev pregled pri kretanju vozila (vremenski uslovi, izgled ulaznog portala, izgled okoline prije i pri ulasku kroz portal, ...). Problem koji projektant pravilnim odabirom rasvjete mora da prevaziđe je zahtjev za vozačevim prilagođenjem vida pri samom ulasku u tunel. Usled nagle promjene sjajnosti kod oka se, u tom trenutku, javlja potreba za širenjem zenice oka, kako bi se uspostavio normalan vid. To vrijeme adaptacije vida, tj. procesa širenja zenice oka traje oko 1,5 sekundi (trajna adaptacija iznosi oko 60 min.).

Put koji vozač pređe je direktno proporcionalan ovome vremenu adaptacije i moramo računati da, naročito pilikom velike brzine kretanja, može doći do nekih nepredviđenih i opasnih situacija.

Pored fenomena vremenske komponente adaptacije vida postoji i fenomen **prostorne adaptacije**. U toku normalne brzine kretanja učesnika u saobraćaju vozačevo vidno polje je u prostornom konusu od 20%, računajući pravac kretanja. U trenutku kada se vozač približava tunelu njegov pogled se usredsređuje na ulazni portal tunela i smanjuje se samo vidno polje. Kada se nalazimo na udaljenosti portala jednakoj dužini puta zaustavljanja vozila ono iznosi samo 2°, a nakon dalje vožnje opet se povećava.

1.8 Podjela tunela na zone osvjetljenja

Osnovni zadatak koji se postavlja za sistem osvjetljenja u tunelu je da vozaču omogući potpuni vizuelni komfort u svakom trenutku i na svakom dijelu dionice koju prelazi, što se svakako javlja kao preduslov bezbjedne i udobne vožnje.

Sam tunel, sa dionicom ispred i iza njega, je podijeljen na zone osvjetljenja. Njih opredjeljuje, prije svega vizuelni doživljaj vozača koji on doživljava tokom kretanja i vožnje kroz tunel, usled okolnih uslova.

Vidni zahtjevi su u pojedinačnim dionicama različiti što uzrokuje različite karakteristične zone:

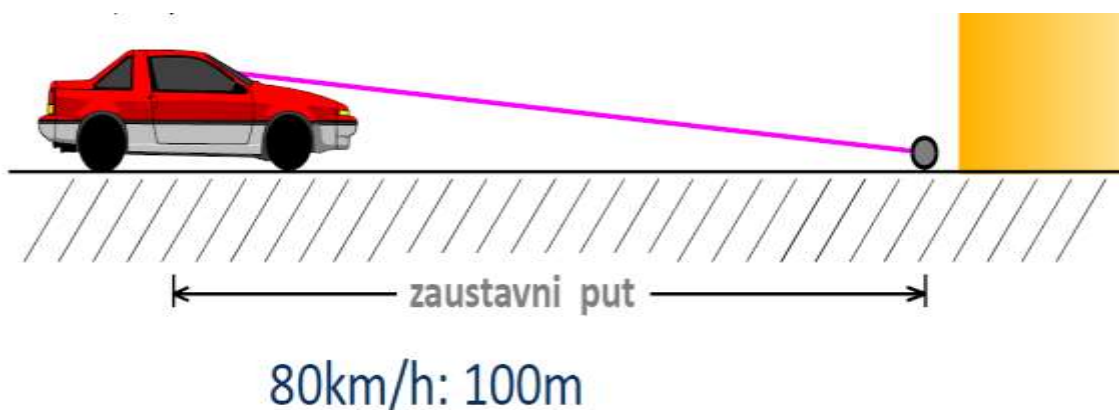
PRILAZNA ZONA – odnosi se na dio saobraćajnice koji je neposredno ispred ulaska u tunel.

Dužina prilazne zone je indentična sa dužinom zaustavnog puta u odnosu na ograničenu brzinu (Slika 3). Dužinom prilazne zone osvjetljenje je manjeg inteziteta, ili pak mnogo većeg od onog koje slijedi u unutrašnjosti tunela. Njega opredjeljuje doba dana, doba godine i svi drugi vremenski uslovi.

U doba dana kontrast u osvjetljenju između spoljašnje sredine i sredine koju ima u unutrašnjosti tunela zamara vozača i traži njegovu jaču koncentraciju. Oko vozača je napregnuto a samim tim se smanjuje se njegova moć da na vrijeme uoči eventualnu prepreku na putu. Pošto je, u tom trenutku, vidno polje vozača značajno umanjeno u ovoj zoni, nastaje fenomen "crne rupe" – usled prelaza iz spoljašnje sredine i koncentracije u vidnom polju samo na ulazni portal tunela javlja se pojava da vozač u jednom kraćem vremenskom periodu ne može da vidi unutrašnjost tunela. Da bi se izbjegla pojava ovakvog fenomena potrebno je osvijetliti prvu, prilaznu zonu tunela u dovoljnoj dužini.

Tokom noćnih uslova imamo situaciju u kojoj dolazimo iz vožnje neosvijetljenim prilaznim putem na vožnju kroz osvijetljeni tunel. I ovdje imamo period koji je neophodan za vizuelnu adaptaciju oka vozača. U tom cilju se ulazna zona tunela osvjetljava uličnim svjetilkama koje imaju niži nivo osvjetljenja od osvjetljenja koji je postignut u samom tunelu.

Prilikom projektovanja osvjetljenja same zone ulaska u tunel mora se obezbijediti da je vozač u mogućnosti da, ako na putu postoji neka prepreka, može na vrijeme zaustaviti auto (Slika 3) i izbjeći kontakt. Prilikom prelaska ovakve dužine puta, ispred i do ulaska u tunel, vozačevo oko mora da se prilagodi promjeni uslova vožnje. Mora se adaptirati na vidljivost i prostor oko sebe.



Slika 3. Zaustavni put vozila [5]

Ako bi vozač, u bilo kojem trenutku, uočio neku prepreku na putu, dužan je da koči i totalno zaustavi vozilo. Ta dužina pređenog puta se naziva zaustavnim putem. Od uočavanja prepreke, do povratnog signala od strane ljudskog mozga i slanja komande na izvršenje radnje, potrebno je neko vrijeme (vrijeme reagovanja), a u tom period vozilo se i dalje kreće prethodnom brzinom. Vozilo će za to vrijeme proći neki mali dio puta i taj pređeni put nazivamo putem reagovanja.

Da ne bi udario u prepreku mora se uračunati i sigurnosni razmak koji će postojati između prepreke i vozila koje je totalno zaustavljeno.

Preostali dio zaustavnog puta čini put koji vozilo pređe pri vršenju radnje kočenja.

Vremenski uslovi i brzina kretanja vozila, uz poštovanje tehničke ispravnosti vozila, najviše utiču na samu dužinu ovako formiranog zaustavnog puta (Tabela 1).

Brzina (km/h)	Dužina zaustavnog puta SD (m)
60	60
70	75
80	100

Tabela 1 – Dužina zaustavnog puta (SD) na ravnom putu [8]

Na put reagovanja uveliko utiče starost lica koje je za upravljačem, vrijeme koje je potrebno da vozač donese odluku da koči kad shvati da ima potencijalnu prepreku na putu ispred sebe. Ako vozaču treba više vremena, zbog nekih specifičnih uslova, da pritisne kočnicu, ovaj put će se povećati. Na njegovu dužinu utiču ispravnost i tip kočionog sistema, kvalitet guma na točkovima, sadržaj površine puta.

Vozač ima zadatak da zaustavi vozilo. Znači, kinetička energija vozila pri određenoj brzini prije kočenja (E_k), mora da se potroši na energiju koja se stvara pri radu sile kočenja (P_k).

$$E_k = P_k \quad (1)$$

Ovdje je:

E_k - kinetička energija vozila,

P_k - sila kočenja.

Kada se ove dvije veličine izjednače, dobija se vrijednost za pređeni put prilikom kočenja:

$$m \cdot v^2 / 2 = G \cdot f_1 \cdot lk \quad (2)$$

$$G \cdot v^2 / (2 \cdot g) = G \cdot f_1 \cdot lk \quad (3),$$

Gdje su:

G - ukupna težina vozila

g – gravitaciono ubrzanje

f_1 – faktor trenja

lk – put kočenja

Znači, jasno proizilazi iz gore navedenog, da je zaustavni put vozila put koji vozilo pređe od trenutka kad je uočena opasnost, neka prepreka ili se javila potreba za zaustavljanjem, pa do konačnog zaustavljanja, što je grafički prikazano tabelom 2.

	put reagovanja	put kočenja	sigurnosni razmak	
prethodni pređeni put ($V_0 t$)				
status	uočavanje opasnosti	aktiviranje kočnice	zaustavljeno vozilo	eventualna prepreka

Tabela 2 – Grafički prikaz zaustavnog puta [8]

ZONA ADAPTACIJE – zona koja je mjerodavna za prilagođavanje osvijetljenja za dalju vožnju kroz sam tunel.

Nju čine zajedno zona praga i prelazna zona u tunelu, a ona povezuje prilaznu i unutrašnju zonu tunela.

Kada se uzmu u obzir brzina vožnje i pripadajući svjetlotehnički parametri prilazne i unutrašnje zone tunela dobićemo ukupnu dužinu zone adaptacije.

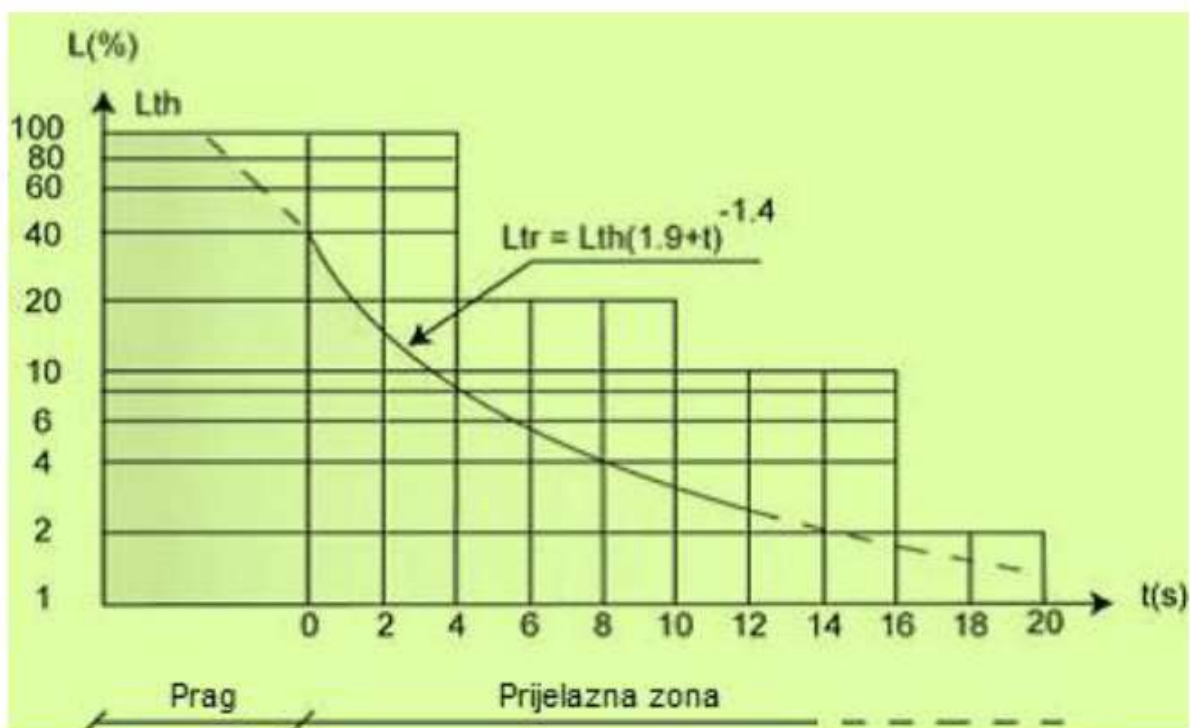
ZONA PRAGA – prva dionica koja nas sreće pri ulasku u tunel.

Zbog smanjenja vidnog polja vozača i moguće pojave fenomena "crne rupe" u ovoj zoni se češće dešavaju saobraćajne nezgode nego u drugim zonama. Zadatak projektanta je da, sa strane vidljivosti, izborom prave rasvjete, obezbijedi bezbjedan ulazak vozaču u tunel i stvori uslove za njegovu dalju vožnju. Prilikom ulaska u tunel imamo nivo sjajnosti koji nazivamo sjajnost praga. Ona je linearno srazmjerna sa nivoom sjajnosti koju smo imali u prilaznoj zoni. Veličina nivoa sjajnosti zone praga mora biti takva da vozač može uočiti postojanje eventualne prepreke na putu. To je tkz. kriterijum vidljivosti. Da bi uočio prepreku mora se voditi računa o jasnom odnosu između sjajnosti prepreke i onoga što je iza nje. Razlika u ovim dvijema sjajnostima naziva se kontrast. Pri projektovanju rasvjete uzima se veličina ovog kontrasta od najmanje 20%.

TRANZITNA (prelazna) – slijedi neposredno iza zone praga. Ovdje se nivo sjajnosti u tunelu postepeno smanjuje, bez narušavanja vidnih uslova, sve do posljednjeg nivoa kojeg diktira nivom osvjetljenja u unutrašnjoj zoni tunela.

U zoni praga projektant ima zadatak da obori nivo sjajnosti na 40% od početne vrijednosti. Kada se postigne vrijednost ovakvog nivoa sjajnosti počinje prelazna zona. Prostorom zone tranzicije faze smanjenja sjajnosti ne smiju prelaziti veličinu koraka 1:3. Ovakvo smanjenje sjajnosti obezbjeđuje ljudskom oku prilagođavanje okolini u "real time" vremenu. Kraj tranzitne zone ujedno označava da je vrijednost sjajnosti u tom trenutku jednaka trostrukoj vrijednosti one sjajnosti u unutrašnjosti.

Na slici 4 je prikazana kriva koja prikazuje zavisnost vrijednosti sjajnosti prelazne zone od sjajnosti zone praga.



Slika 4. Dijagram vizuelnog prilagođavanja na pragu tunela [5]

UNUTRAŠNJA ZONA – prostor između tranzitne i izlazne zone tunela.

Kao što joj samo ime kaže nalazi se u dijelu tunela gdje nemamo nikakav uticaj prirodnog svjetla. Zadatak je napraviti idealno, svrsishodno vještačko osvjetljenje koje će obezbijediti sigurno odvijanje saobraćaja. U tome dijelu tunela zastupljen je najmanji nivo sjajnosti, a vozačevo oko je na njega već adaptirano. Nivo sjajnosti je konstantan u čitavoj dužini te sekcije tunela.

IZLAZNA ZONA – predstavlja sekciju između unutrašnje zone i samog izlaska iz tunela, gdje je i kraj natkrivenog dijela tunela. U ovom dijelu ljudsko oko se adaptira na prelaz iz uslova koji su u tunelu na spoljašnje uslove koje sreće pri izlasku iz tunela. Služi za adaptaciju vozača, u ovom slučaju, sa unutrašnjih na spoljašnje uslove. Ako dužina tunela nije velika oko se brzo adaptira, pa nema nekih zahtijeva za dodatnim osvjetljenjem. Kod dugačkih i veoma dugačkih tunela javlja se potreba za

linearnim povećanjem osvijetljenja u dužini jednakoj dužini zaustavnog puta vozila, pred sam izlazak iz tunela.

Vozač, krećući se prilaznim dijelom polako ulazi u tunel. Prva zona koja počinje pri ulasku u tunel se i naziva ulazna zona. Rasvjeta u prilaznoj zoni i rasvjeta samog ulaza u tunel (Slika 5) imaju zadatak da obezbijede vizuelno prilagođenje vozaču i time ostvare bezbjednost u saobraćaju. Dužina same ulazne zone je koliko i sama dužina zaustavnog puta vozila.



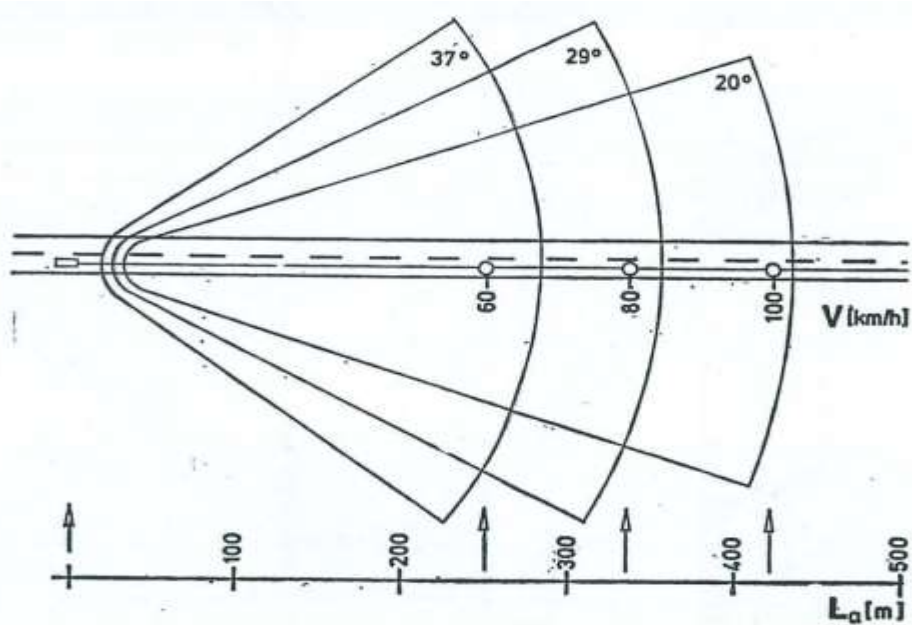
Slika 5. Ulazna zona tunela[5]

Prilikom prisustva dnevne svjetlosti čovječiji vidni sistem uslovljava drukčiji prilaz projektovanju osvijetljenja tunela, naročito zbog problema adaptacije vida. Potrebno je određeno vrijeme da se oči vozača prilagode na promjenu sjajnosti koja vlada izvan i koja je u samom tunelu. Širenje zenica prilikom smanjenja sjajnosti traje oko 1,5 sekundi (trajna adaptacija 60 min.).

Pored fenomena vremenske komponente adaptacije vida postoji i fenomen **prostorne adaptacije**. Ako se vozilo kreće propisanom brzinom tada i vidno polje vozača iznosi iznosi 20° u vidokrugu (Slika 6.).

VIDNO POLJE vozača ima karakteristiku da:

- sa povećanjem dubine vidnog polja L_a , dolazi do promjene u širini vidnog polja (obrnuto proporcionalno),
- se sa porastom brzine, kao posledica povećanja dubine akomodacije oka (promjena žižne daljine) sužava prostorni ugao samog vidnog polja (Slika 6).



Slika 6. Izoštrena dubina i širina vidnog polja u zavisnosti od brzine kretanja [25]

Pređeni put prilikom zaustavljanja vozila je srazmjeran brzini kretanja vozila, o čemu se mora dobro povesti računa. Prilikom prilaska tunel vozač se koncentriše na ulaz u tunel i tada mu se vrlo brzo sužava vidno polje (Slika 7).



Slika 7. Vremensko prilagođavanje [5]

Fenomen „crne rupe“ javlja se kad vozač nije u stanju da sagleda unutrašnjost neosvjetljenog ili loše osvijetljenog tunela (Slika 8). Ako su prilazna zona tunela ili sama ulazna zona tunela neadekvatno osvijetljene nemamo zadovoljavajući kontrast koji je neophodan za uočavanje prepreke, vozači ne vide da li je njihova traka bezbjedna ili ne, pa moraju naglo da usporavaju. Prepreke koje se mogu pojaviti zavise od tipa tunela i od najprisutnijeg tipa saobraćaja (motorna vozila, biciklisti, pješaci).



Slika 8. Efekat crne rupe [5]

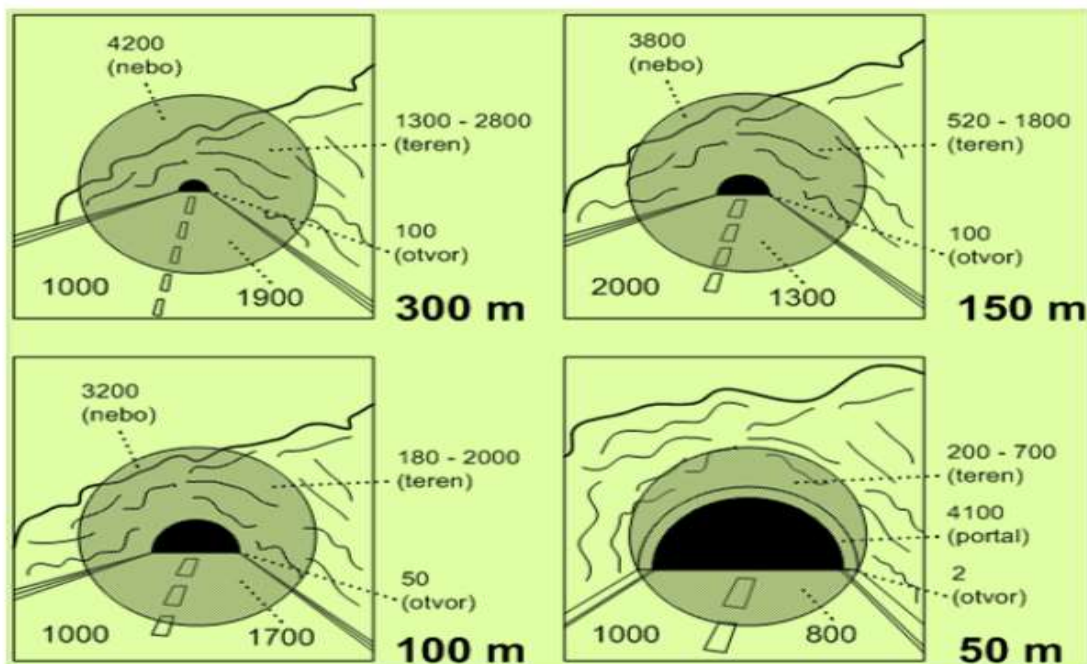
Pojava "Crne rupe" prouzrokuje vozačevu nesigurnost pri vožnji i stvoriti neugodan osjećaj kod njega.

1.9 Određivanje parametara kod vizuelnog i prostornog prilagođavanja

Prva faza pri projektovanju rasvjete tunela zahtijeva postavku osnovnih smjernica koje se tiču svjetlotehničkih zahtijeva. Kada se završi sa usvajanjem i određivanjem smjernica prelazi se na fazu projektovanja. U njoj se definišu i određuju parametri rasvjete, određuje se stepen i vid regulacije i projektuje samo upravljanje rasvjetom. Prilikom realizacije druge faze projektovanja pažnja se poklanja na definisanje i dijagnostiku referentnih veličina. Prije nego što pristupimo projektovanju poslužićemo se bazom podataka koja već postoji u tkz. ekspertnom sistemu, a zasnovana je na prethodnim iskustvima. Poslije tako oformljene baze podataka prilazi se razradi konkretnog primjera.

Vidno polje vozača i sjajnost čine najvažnije segmente prilikom projektovanja rasvjete tunela.

Promjena sadržaja tokom vizuelnog prilagođavanja na raznim udaljenostima od ulaska u tunel u mnogome utiče na definisanje veličina koje će kasnije biti korišćene prilikom određivanja parametara rasvjete. Na slici 9 su prikazane promjene sadržaja u vidnom polju zavisno od udaljenosti od ulaznog portala tunela.



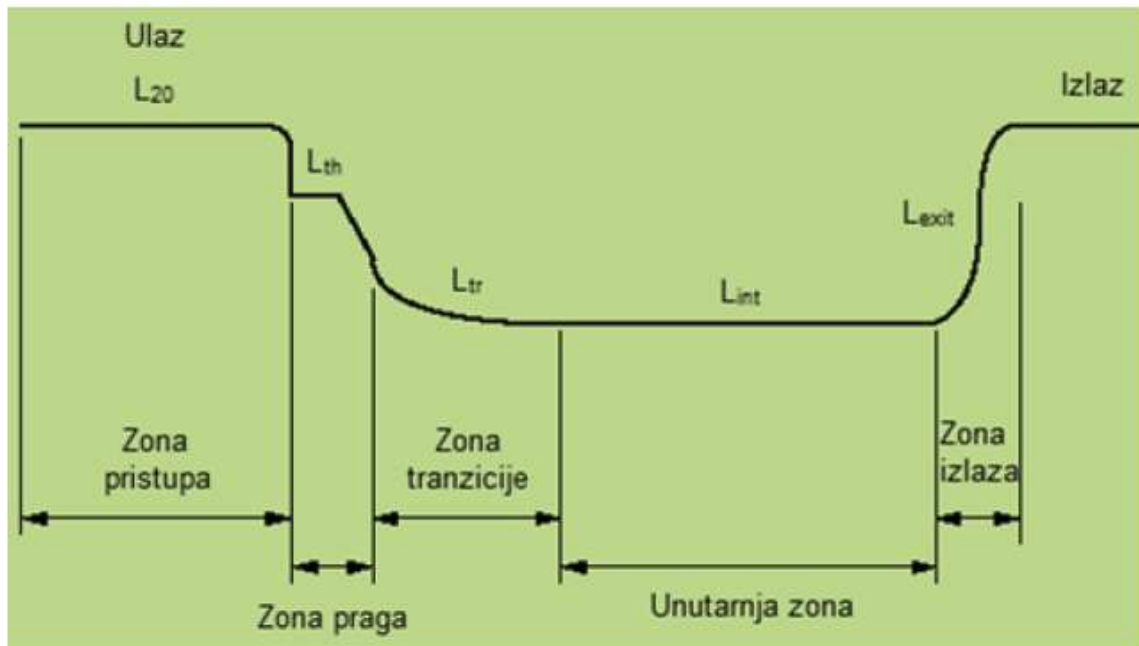
Slika 9. Različit sadržaj vidnog polja zavisno od udaljenosti vozila od ulaska u tunel [5]

Zavisno od toga kakvo je vidno polje vozača zavisice i sama dužina vremenskog i prostornog prilagođavanja vozača.

Kao što se vidi sa slike 9 na promjenljivi sadržaj vidnog polja utiče sve ono što vozač vidi: dio neba, spoljnji izgled ulaznog portala, sam portal i ulaz u tunel, cesta i okolina ceste u smjeru vožnje. Kakav je stepen vidljivosti zavisu u mnogome i od samog sloja atmosfere između vozača i ulaznog portala tunela.

U prilaznoj zoni, prilikom određivanja vrijednosti nivoa sjajnosti, moramo voditi računa o svemu što može da utiče na bezbjednost vožnje. Mora se vidjeti koliko je dionica pri prilazu tunelu direktno izložena sunčevom zračenju. Na preglednost utiče sama građevinska konstrukcija ulaznog portala (dimenzije i oblik) i izgled okoline koja nas prati do tunela. Bitan je predio gdje se tunel nalazi, da li je u planini ili je na ravnicima, kako je orijentisan ulazni portal. Vidljivost uvijek zavisu od vremenskih uslova i sredine kroz koju se vozač kreće (zelenilo, stijene, kamen,...).

Osvjetljenje tunela u dnevnim usloviima karakterišu različiti nivoi sjajnosti koji odgovaraju definisanim zonama (Slika 10). Pri tome se nivo sjajnosti u prilaznoj zoni odnosi na dnevnu svijetlost, a u svim ostalim zonama na vjestačku svijetlost.



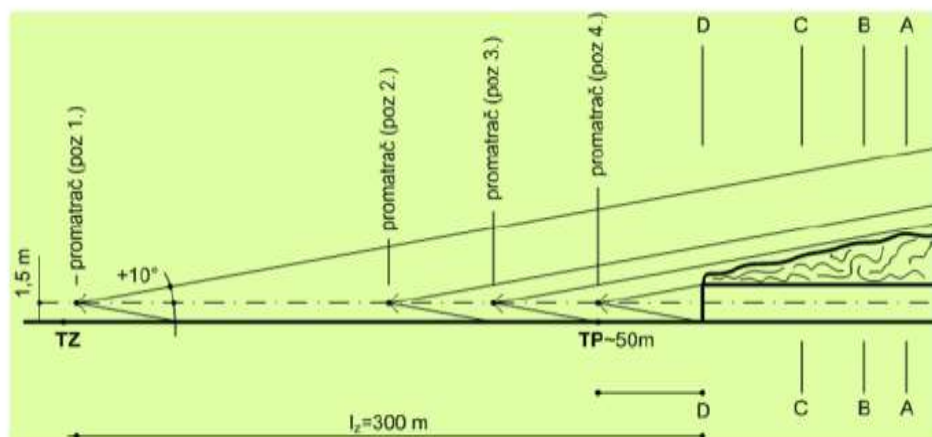
Slika 10. Vizualno prilagođavanje pri prelasku iz jedne zone u sledeću zonu tunela[2]

Za proračun vizuelnog prilagođavanja danas se često koristi tzv. „L20 metoda“.

Prva zona na koju nailazimo pri kretanju vozilom kroz tunel je zona praga. Samim tim, zona praga isključivo je zavisna od sjajnosti prilazne zone tunelu.

Prelaskom sa jednog nivoa sjajnosti van tunela na drugi nivo sjajnosti u tunelu, izvršiće se adaptacija. Na adaptacionu sjajnost veliku ulogu ima sama sjajnost osnovnog vidnog polja vozača, kao i sama sjajnost u okolini ulaznog portala stvorena neposredno svim ostalim sjajnostima oko ulaznog portala.

Za sjajnost prilazne zone L_{20} uzeta je srednja veličina sjajnosti dobijena mjerenjem sjajnosti sa rastojanja jednakom dužini zaustavnog puta od početne tačke vidnog polja vozača do ulaska u tunel. Vidno polje je konusnog oblika. Za početnu tačku vidnog polja vozača uzima se tačka koja bi bila u visini njegovih očiju (oko 1,5 m) i uzima se da je vozač u poziciji na njegovoj pripadajućoj sredini puta (Slika 11).



Slika 11. Promjena sadržaja tokom vizuelnog prilagođavanja pri približavanju ulazu u tunel [5]

Usled velike razlike sjajnosti između unutrašnjosti i spoljašnjeg prostora tunela vozač će vidjeti u dubini tunela do tačke A.

Mjerenje veličina sjajnosti vrši se mjerenjem sjajnosti sa rastojanja jednakom dužini zaustavnog puta od početne tačke vidnog polja vozača do ulaska u tunel. Proces se ponavlja više puta tokom godine. Iz prikupljene baze podataka zna se koja je najviša vrijednost za L_{20} .

2. Analiza kriterijuma kvaliteta tunnelske rasvjete

2.1 L₂₀ METOD – preporuka CIE 88

Sama vrijednost L₂₀ zavisi od trenutnih vremenskih prilika vezanih za različito doba godine pa njenu vrijednost ne možemo dobiti mjerenjem. Za izbor vrijednosti L₂₀ možemo, saglasno međunarodnim preporukama (CIE88), koristiti podatke date u tabeli 3.

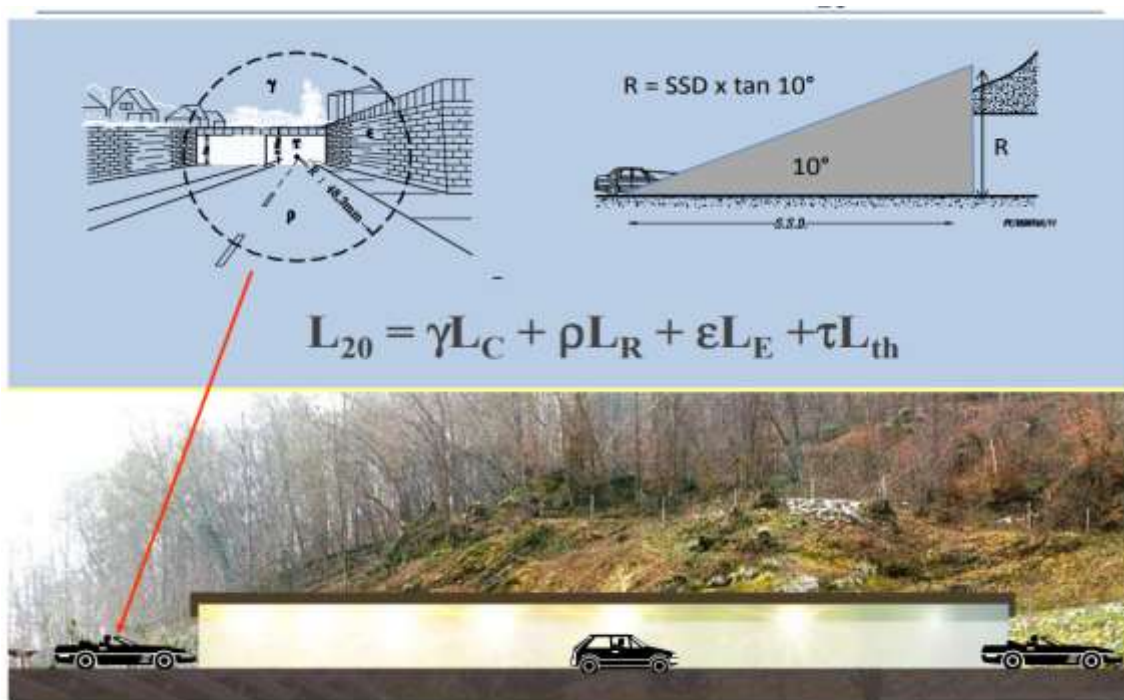
prosječna sjajnost L ₂₀ u 20° konusnom vidnom polju, u cd/m ²																
procenat neba u 20° konusnom vidnom polju, u cd/m ²																
35%																
25%																
10%																
0%																
sjajnost u vidnom polju	normal		snijeg		normaln		snijeg		normal		snijeg		normal		snijeg	
	N	V	N	V	N	V	N	V	N	V	N	V	N	V	N	V
	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
zaustavni put 60m	(4)	(4)	(4)	(4)	4000	5000	4000	5000	2500	3500	3000	3500	1500	3000	1500	4000
zaustavni put 100m-	4000	6000	4000	6000	4000	6000	4000	6000	3000	4500	3000	5000	2500	5000	2500	5000

NAPOMENA: N - niska sjajnost, V- visoka sjajnost

Tabela 3 - Procjena sjajnosti L₂₀ [8]

U tabeli 3 prilikom odabira vrijednosti sjajnosti L₂₀ biramo neke tipične vrijednosti procenta neba u vidnom polju vozača za naš slučaj, uzimamo u obzir dužinu zaustavnog puta kao i orijentaciju puta. Takvo određivanje pomenute veličine je približno i uzima se samo kod primjene orijentacione vrijednosti ako je to dozvoljeno projektnim zadatkom, a mi ne posjedujemo tačnu vrijednost.

Ako se projektnim zadatkom traži preciznija vrijednost za sjajnost L₂₀ tada se pribjegava fotografisanju ulaznog portala tunela sa udaljenosti jednakoj dužini zaustavnog puta. Položaj fotografskog aparata je tačka iz koje vozač posmatra ulaz u tunel, simulira se visina položaja oka vozača u odnosu na cestu. Na tako dobijenoj slici se vide procenti učešća sjajnosti neba, puta, okruženja, sjajnost na ulazu u tunel u vidnom polju vozača.

Slika 12. Određivanje sjajnosti prilazne zone L₂₀ [5]

Vrijednost L₂₀ data je sledećom formulom:

$$L_{20} = \gamma L_C + \rho L_R + \varepsilon L_E + \tau L_{th} \quad (4)$$

gdje su:

L _C – sjajnost neba na ulazu u portal tunela	γ - % neba,
L _R – sjajnost puta ispred vozača	ρ - % puta,
L _E – sjajnost okruženja na ulaznom portalu tunela	ε = % okruženja.
L _{th} = sjajnost na ulazu u tunel	τ = % ulaza,

gdje je $\gamma + \rho + \varepsilon + \tau = 100 \%$.

Imajući u vidu da su vrijednosti L_{th} i τ zanemarljive prema vrijednostima koje posjeduju ostali parametric formula (4) dobija sledeći oblik:

$$L_{20} = \gamma L_C + \rho L_R + \varepsilon L_E \quad (4a)$$

Preostale vrijednosti sjajnosti neba, puta i okruženja tunelskog portala daju se tabelarno i služe kao približne vrijednosti za određeni slučaj. Vrijednosti u tabeli 4 se uzimaju kao parametar ako nemamo njihovu tačnu lokalnu vrijednost.

Smjer vožnje	L _c (nebo) kcd/m ²	L _R (put) kcd/m ²	L _E (okruženje) kcd/m ²			
			Stijene	Zgrade	Snijeg	Vegetacija
N - Sjever	8	3	3	8	15 (V -H)	2
E - istok W – zapad	12	4	2	6	10 (V)	2
					15 (H)	
S - Jug	16	5	1	4	5 (V)	2
					15 (H)	
Napomena: V se odnosi na vertikalne, H na horizontalne površine						

tabela 4 – vrijednosti sjajnosti neba, puta i okruženja na ulazu u tunel [5]

Prilikom ulaska u tunel počinje zona praga. U njoj je veličina sjajnosti linearno proporcionalna vrijednosti sjajnosti ulazne zone. Znači, njena vrijednost je definisana njihovim odnosom (relacija 5).

$$K = L_{th}/L_{20} \quad (5),$$

gdje su:

L_{th} = sjajnost na ulazu u tunel,

L₂₀ = sjajnost prilazne zone.

Na vrijednost ovih parametara utiče vrijednost sistema osvjetljaja primjenjenog za konkretni slučaj, a sve u odnosu na dužinu zaustavnog puta vozila (tabela 5).

	Simetrični sistem L _p /E _v ≤ 0,2	Kontra fluks L _p /E _v ≥ 0,6
Zaustavni put (S.D.)	k = L _{th} /L ₂₀	k = L _{th} /L ₂₀
60m	0,05	0,04
100m	0,06	0,05
160m	0,10	0,07

Tabela 5 – Odnos k [8]

Usvajanjem novih međunarodnih preporuka za određivanje raznih parametara tunelske rasvjete i samom izboru sistema osvjetljenja faktor k ima istu vrijednost kod oba sistema. Tabela 6 daje prikaz vrijednosti jedinstvenog faktora k. On je sad zavistan samo od brzine kretanja automobila, pa samim tim zavisi od njegovog pripadajućeg zaustavnog puta.

/ CIE 88: 2004 I CEN/TR 14380: 2003 – Aneks A1 /

Brzina vozila (km/h)	$K=L_{th}/L_{20}$
< 60 km/h	0,05
80 km/h	0,06
100km/h	0,08
120 km/h	0,10

Tabela 6 - Sjajnost zone praga L_{th} [5]Nivoi sjajnosti prelazne zone L_{tr}

Oči vozača u prelaznoj zoni i dalje trpe proces prilagođavanja usled postepenog opadanja stepena sjajnosti. Taj proces se završava onda kada sjajnost pane na vrijednost sjajnosti unutrašnje zone. Taj proces matematički prikazuje relacija:

$$L_{tr} = L_{th} (1,9 + t)^{-1,4} \quad (6),$$

L_{tr} – vrijednost sjajnosti ispod koje se ne dopušta manja sjajnost u tranzitnoj zoni u svakom trenutku t vremena provedenog u ovoj zoni.

Ako se ograničimo početnom vrijednošću za t , tj. uzmemo $t=0$, što ujedno označava i početak tranzitne zone, dobijamo početnu vrijednost za L_{tr} :

$$L_{tr} = 0,4 L_{th}$$

Nivoi sjajnosti unutrašnje zone L_{in}

Veličinu parametra nivoa sjajnosti u ovoj zoni tunela zavisi isključivo od brzine vožnje učesnika u saobraćaju i same gustine saobraćaja kroz tunel. U tabeli 7 date su proračunate vrijednosti za L_{in} u odnosu na gustinu saobraćaja kroz tunel i pripadajuću dužinu zaustavnog puta vozila.

Zaustavni put SD (m)	Protok saobraćaja		
	Nizak (< od 100 v/h)	Srednji (100 - 1000 v/h)	Visok (> od 1000 v/h)
160m	5 cd/ m ²	10 cd/ m ²	15 cd/ m ²
100m	2 cd/ m ²	4 cd/ m ²	6 cd/ m ²
60m	1 cd/ m ²	2 cd/ m ²	3 cd/ m ²

Tabela 7 – preporučene vrijednosti za nivo sjajnosti unutrašnje zone L_{in} (u cd/m²) [5]

Kod veoma dugih tunela besmisleno je održavati konstantnu vrijednost sjajnosti unutrašnje zone cijelom njenom dužinom. Nove preporuke omogućavaju ekonomiju u potrošnji električne energije usled redukcije nivoa sjajnosti i podjele unutrašnje zone na dvije cjeline.

Prvi dio unutrašnje zone određen je dužinom koje vozilo pređe krećući se određenom brzinom u vremenu od trideset sekundi. Vrijednosti sjajnosti u ovom dijelu unutrašnje zone prikazan je tabelom 8.

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

Tabela 8 – preporučene vrijednosti za nivo sjajnosti unutrašnje zone L_{in} (u cd/m²) [5]

Drugi dio unutrašnje zone određen je preostalim dijelom unutrašnje zone dužinom trase koja vodi do njenog završetka. Vrijednosti sjajnosti u ovom dijelu unutrašnje zone prikazan je tabelom 9, koja se primjenjuje kod veoma dugih tunela.

	Veoma dugi tuneli	
	Protok saobraćaja	
Zaustavni put SD (m)		
	Nizak	Visok
160 m	2,5 cd/ m ²	4.5 cd/ m ²
60 m	1 cd/ m ²	2 cd/ m ²

Tabela 9 – preporučene vrijednosti za nivo sjajnosti unutrašnje zone L_{in} (u cd/m²) [5]

Nivoi sjajnosti *izlazne zone* L_{ext}

Prilikom izlaska iz tunela proces adaptacije ljudskog oka na promjenu sjajnosti je mnogo lakši i brži nego što je to bio pri ulasku u tunel. Zbog te činjenice uglavnom nema ni potrebe dodatno regulisati nivo sjajnosti u izlaznoj zoni.

Odstupanja se rade kada postoje realni razlozi za povećanje sjajnosti, a ogledaju se u tome što:

1. Usled bliještanja koje se može pojaviti od vrlo svijetlog izlaza iz tunela može doći do situacije da ne vidimo prisustvo nekih gabaritno manjih vozila ispred nas, usled njihovog zaklanjanja od strane većih vozila. Tada se ima za potrebu postići veći nivo osvijetljenja, kako bi se manja vozila jače osvijetlila,
2. Kod učesnika u saobraćaju koji upravljaju dugačkim vozilom, pri pregledu unazad, pogled u retrovizor, treba olakšati puni pregled saobraćaja iza njega.

Dužina izlazne zone, shodno preporukama, ne treba da prelazi 200m. U noćnim satima ova zona se osvjetljava u slučaju kada se nastavlja putovanje po neosvijetljenom putu, pri brzini vožnje koja prelazi 50 km/h, ako je ispunjen uslov da je noćno osvjetljenje tunela veće od 1cd/m² i kada očekujemo da na izlasku iz tunela imamo skroz drugačije vremenske uslove od onih koje smo imali na ulasku u tunel.

Ako se kroz tunelsku cijev odvija dvosmjerni saobraćaj onda se izlazna i ulazna zona tog tunela jednako osvjetljava jer je svejedno iz kojeg ih pravca posmatramo.

2.2 Sistemi osvijetljenja tunela

2.2.1 Izbor sistema osvijetljenja tunela

Izborom prave rasvjete projektant će obezbijediti da sa strane vidljivosti vozač bezbjedno uđe u tunel i nastavi dalju vožnju. Vozač se odmah sreće sa nivoom sjajnosti sjajnosti koji nazivamo sjajnost praga. Veličina nivoa sjajnosti zone praga mora biti takva da vozač može uočiti postojanje eventualne prepreke na putu. Prepreka na putu ima neku vrijednost osvijetljenja po vertikali a iza nje je pozadina.

Vrijednost koja se dobija odnosom sjajnosti pozadine sa vertikalnom osvijetljenosti iste prepreke naziva se koeficijent kontrasta (relacija 7).

$$q_c = L_p/E_v \quad (7)$$

gdje je:

q_c – contrast revealing coefficient,

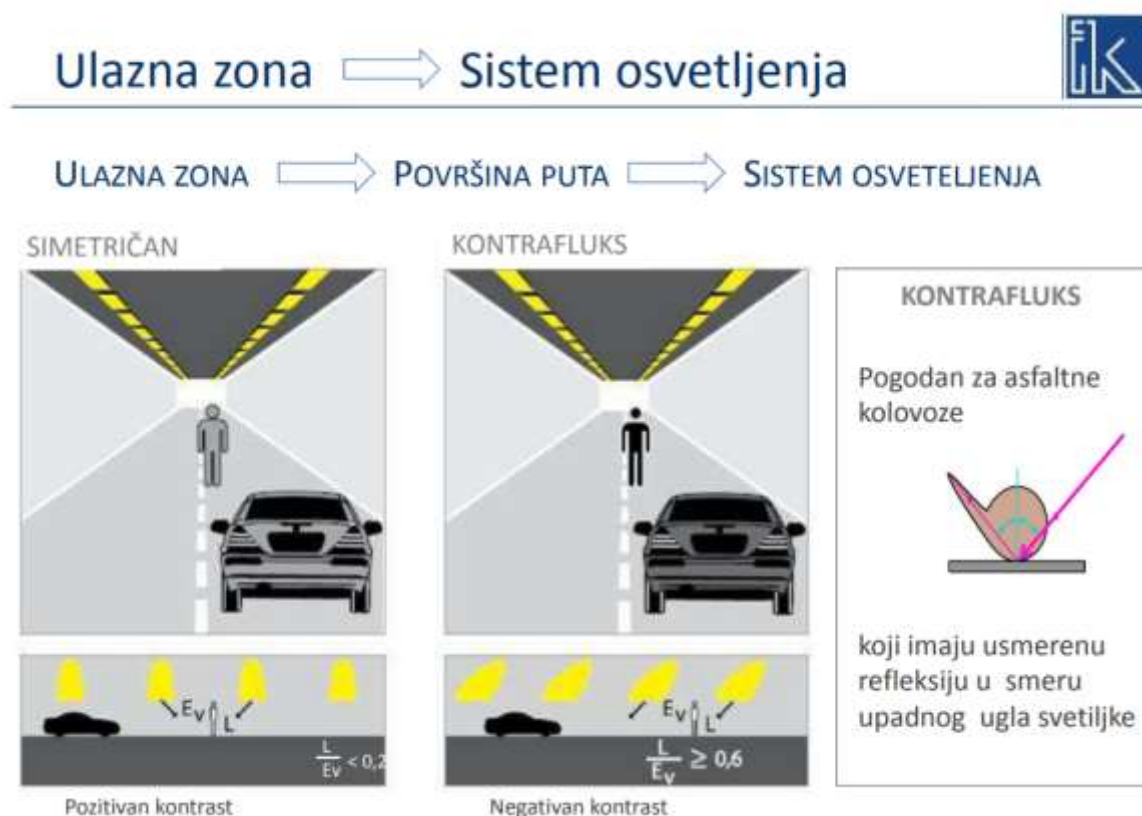
L_p - sjajnosti pozadine prepreke,

E_v - vertikalne osvjetljenosti prepreke.

Ako se izabere sistem osvjjetljenja koji ima poprečnu raspodjelu svjetlosnog fluksa (svjetlost se usmjerava vertikalno na vozilo i prepreku) u smjeru kretanja, vozila imaćemo da je E_v (vertikalna osvjetljenost prepreke) veća od L_p (sjajnost pozadine prepreke). Tada je vrijednost q_c (contrast revealing coefficient) veća od nule i imamo **pozitivan kontrast** (Slika 13).

Kod ovakvih sistema zahtijeva se uslov $L_p/E_v \leq 0$.

Ako se izabere sistem osvjjetljenja koji usmjerava svjetlost prema vozilu koje dolazi (svjetlost se usmjerava pod uglom prema vozilu i pozadini prepreke) imaćemo da je prepreka tamnija od njene pozadine (kolovoza), pa je vrijednost q_c (contrast revealing coefficient) manja od nule i imamo **negativan kontrast** (slika 13).



Slika 13. Simetrični (pozitivan kontrast) i asimetrični sistem osvjjetljenja (negativan kontrast) [8]

2.2.2. Ravnomjernost sjajnosti u tunelu

Za svako doba dana i noći pitanje održavanja ravnomjernosti sjajnosti u tunelu je veoma i podjednako važno u oba slučaja.

Kao mjerilo kvaliteta rasvjete tunela ona mora da bude isprojektovana tako da se uzima u obzir da se ujednačenost sjajnosti površine kolovoza odnosi se na unutrašnju zonu tunela u vožnji po danu, dužinu tunela za najniži režim rasvjete u vožnji po danu, dužinu tunela za režim rasvjete u vožnji noću i dionice puta prilazne i odlazne zone u vožnji noću.

Ravnomjernost sjajnosti u tunelu, znači sjajnost kolovoza i sjajnost zidova, u mnogome zavisi od izbora samih svetiljki i njihovog izvora svijetla, od toga na koji način će biti raspoređene i montirane, zavisno od same konstrukcije tunela i samog izgleda poprečnog presjeka nekog od profila tunelske cijevi.

Uslov ravnomjernosti sjajnosti zidova i kolovoza u tunelu je zadovoljena ako su zadovoljene opšta i podužna sjajnost u tunelu.

Opšta ujednačena sjajnosti (U_0) u tunelu je zadovoljavajuća ako je:

$$U_0 = (E_{min}/E_{sr}) \geq 0.4 \quad (8)$$

gdje je:

U_0 - opšta ujednačenost,

E_{min} – minimalna osvijetljenost kolovozne trake i zidova tunela,

E_{sr} - srednja osvijetljenost kolovozne trake i zidova tunela.

Podužna ujednačenost (U_L) u tunelu je zadovoljavajuća ako je:

$$U_L = (E_{min}/E_{max}) \geq 0.6 \quad (9)$$

gdje je:

E_{min} – minimalna osvijetljenost duž ose svake kolovozne trake,

E_{max} - maksimalna osvijetljenost duž ose svake kolovozne trake.

Sjajnost na zidovima

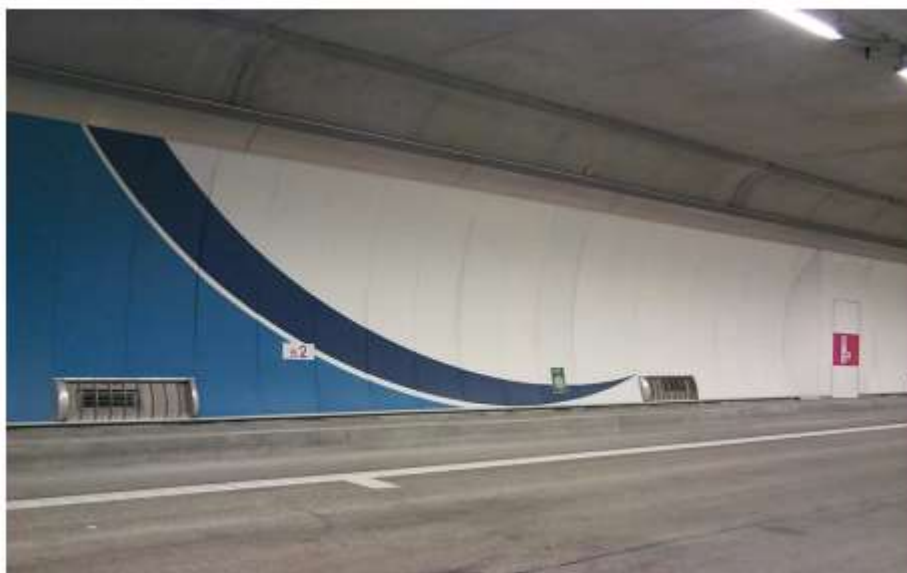
Dužinom čitave tunelske cijevi nivo sjajnosti zidova mora da prati nivo sjajnosti kolovozne trake. Zidovi se u tunelu farbaju do visine od dva metra iznad asfalta. Uslov koji treba postignuti dat je veličinom njihovog odnosa.

$$L_{Zida} \geq 0.6 \times L_{Puta} \quad (10)$$

gdje je:

L_{Zida} nivo sjajnosti na zidovima tunela,

L_{Puta} - nivo srednje sjajnosti puta.



Slika 14. Sjajnost na zidovima [5]

Na slici 14 je prikazana sjajnost zidova, koja prati sjajnost kolovoza. Ovim se postiže bolje vizuelno vođenje kroz tunel, čime se podiže veći nivo bezbjednosti. Veličina sjajnosti površine zidova tunela uveliko doprinosi boljoj rasvijetljenosti u vozačevom vidnom polju, posebno pri zapažanju prepreka koje su veće od standardnih. One se lakše ocrtavaju na svijetlim pločama zidova tunela, a manje na površini kolovoza. Moramo voditi računa da se sa glatkih i svijetlih površina svjetlost bolje reflektuje i da tako stvorena refleksija utiče na povećanje nivoa sjajnosti kolovozne trake. Povećenje sjajnosti može iznositi i do petnaest procenata.

2.2.3 Ograničenje blještanja u tunelu

Montaža svrtiljki u tunelu izvodi se uglavnom po gornjem svodu tunela, na znatno manjoj visini nego što je slučaj kod otvorenog dijela saobraćajnice. Pošto je visina kačenja niska, iste se moraju obavezno na neki od načina zasjeniti, kako ne bi odmah došlo do prekovremenog blještanja svrtiljki. Blještanje se lakše manifestuje u noćnim satima pa se o tim uslovima vodi posebno računa.

Kod tunnelske rasjete prisutno je fiziološko blještanje. Ono se javlja ako se od nekog od izvora svjetla, posmatrajući iz pravca pozicije vozača, pojavi jača svjetlost izvora od one koju isti daje u drugim pravcima. Fiziološko blještanje u velikoj mjeri smanjuje vidne performanse vozača, utiče na osjetljivost za kontrast, uzrokuje pojavu koprene na ljudskom oku i samim tim smanjuje mogućnost uočavanja prepreka na putu. Na oštrinu vida kod prolaska kroz tunel utiče i sastav izvora svjetlosti koji određuje boju emitovanja svjetla. Samim tim ona utiče i na osvijetljenost eventualnih prepreka u tunelu. Boja svjetla utiče i na brzinu regeneracije oka nakon pojave blještanja.

2.2.4 Fenomen treperenja

Ako se desi da montaža svrtiljki na gornjem svodu tunela nije izvedena kako treba dolazi do pojave treperenja. Kada se svrtiljke montiraju u nizu koje čine jednu traku treba obratiti na razmak između njih. Ako razmak nije dobro isprojektovan, pri određenoj brzini će se vozaču u njegovom vidnom

polju smjenjivati svijetla i tamna polja, koje i dovode do fenomena "efekta treperenja". Osim od samih instaliranih svjetiljki na pojavu ovog fenomena utiče i dodatna svjetlost koja se reflektuje od sjajnih djelova automobila, od reflektovane svjetlosti sa nekih drugih prepreka, oznaka, zidova tunela. Na učestalost treperenja utiče brzina kretanja vozila i rastojanje između montiranih svjetiljki. Vrijeme izloženosti pojavi treperenja je obrnuto proporcionalno brzini kretanja. Pošto je unutrašnja zona tunela ujedno i najduža, samim tim se ovaj efekat praktično tretira samo za nju.

Ako se svjetiljke postave jedna za drugom u neprekidnom nizu ovaj efekat biće zanemaren. Odabirom svjetiljki manje sjajnosti ublažićemo ovaj efekt, kao i odabirom boje zidova tunela kojom postžemo ravnomjernost sjajnosti u tunelu.

2.2.5 Osvjetljenje tunela u noćnim satima

Noću u tunelu vladaju inverzni režimi u odnosu na dnevne. Sad je visok nivo sjajnosti u tunelu a ne van njega. Tada ljudsko oko ponovo ima problem sa prilagođavanjem na promjenu sjajnosti. Da bi izbjegli ovu pojavu pribjegavamo osvjetljenju dijela dionice puta odmah po izlasku iz tunela i to tako da ona iznosi 30% nivoa sjajnosti izlazne zone. Dovoljno je da ta dužina bude ekvivalentna dužini koju vozilo pređe za 5 sekundi krećući se dozvoljenom brzinom. Noću se isključuje dio svjetiljki koji se koristi u dnevnim uslovima. Nivo sjajnosti noću u tunelu, kada nemamo osvjetljenje na prilaznom putu, mora iznositi barem 1cd/m^2 .

2.2.6 Vizuelno (optičko) vođenje

Vozaču se u toku svakog momenta vožnje mora obezbijediti jasna slika puta ispred sebe u dužini koja će mu omogućiti bezbjedno zaustavljanje. Sama rasvjeta na trasi puta mora istaći granice kolovoza i ostalih pratećih sadržaja tunela. Kvalitetno odrađeno optičko vođenje pričinjava vozaču veliku udobnost i sigurnost u vožnji. Raspored kačenja svjetiljki igra veliku ulogu prilikom vožnje. One se postavljaju tako da prate vozača u svakom trenutku. Radi blagovremenog i tačnog upravljanja vozilom u oštrim krivinama svjetiljke treba pomjeriti prema zidu koji prati spoljšnju stranu krivine tunela, radi praćenja trase.

Zidovi tunela igraju veliku ulogu u vizuelnom vođenju. Oni se farbaju u boju koja je nešto svjetlija od osvijetljene površine kolovoza. Vodi se računa o ispravnosti horizontalne signalizacije u tunelu.

2.2.7 Ostale svjetlotehničke smjernice za osvjetljenje tunela

- Mjere pri izgradnji tunela koje doprinose bržoj adaptaciji vozačevog oka na uslove pri ulasku i izlasku iz tunela

Ljudsko oko podnosi promjene prilikom promjene nivoa sjajnosti u različitim zonama i na dionicama puta. Kako bi se uticalo na ovu pojavu već pri samom prilasku i ulasku u tunel, možemo preduzeti par koraka:

- prilikom projektovanja trase samoga puta treba sagledati, ako je to moguće, orijentaciju tunela koji je najpovoljnija sa stanovišta klimatskih uslova, uticaju direktne sunčeve svjetlosti na vozača pri prilazu tunelu,
- ulazni portal tunela treba urediti i istaći, okolinu kultivisati i posaditi razno drveće,
- u dužini od oko 200m istaći što tamnijom nijansom površinu ceste kojom se približavamo tunelu.

Sa druge strane, kada se uđe u tunel, već su preduzete neke mjere na smanjenju nivoa sjajnosti u zoni praga, kako bi prelaz iz svijetlog u tamno bio što podnošljiviji. Za razliku od nijanse boje kolovoza do ulaza, kolovoz u ovoj zoni tunela je što više svjetliji, svijetlo su obojeni zidovi ulaznog portala tunela.

Glatka asfaltna površina i sjajni zidovi pojačaće osvjetljenost usled refleksije svjetlosti.

- Dužina tunela i njegova potreba za osvjetljenjem

Projektovanje rasvjete tunela i njena realizacija je od ogromnog značaja za bezbjedonosno i udobno putovanje. Kod projektovanja tunela kao bazični podaci se uzimaju podaci koji važe za veoma duge tunele. Svi ostali tuneli se tu uklapaju. Kod kratkih tunela je bitno da li se izlaz iz tunela vidi sa mjesta koji odgovara dužini zaustavnog puta. Obično se tuneli krći od 25 m ne osvjetljavaju u dnevnim uslovima. Ako je tunel duži od 150m tada se projektovanju rasvjete prilazi normalno, računajući normalni početni nivo zone praga tunela. Kod tunela koji su dužinom između ovih veoma je bitna činjenica da li je izlaz iz tunela potpuno vidljiv sa mjesta koji je od ulaza u tunel udaljen za dužinu zaustavnog puta, da li je prodor dnevne svjetlosti na ulaznom portalu dobar ili loš.

- Izbor svjetiljki za unutrašnju montažu

Kako će se svjetiljke montirati zavisi od poprečnog presjeka tunelke cijevi. Postavljaju se tako da obezbijede kvalitetno vizuelno vođenje, na rastojanju koje eliminiše pojavu "fenomena treperenja". Broj svjetiljki tip i jačina svjetlosnog izvora mora zadovoljiti podatke dobijene fotometrijskim proračunima.

Svjetiljke upostavljene na svodu tunela moraju imati određenu mehaničku zaštitu i zaštitu od agresivnih uslova u tunelu (usled izduvnih gasova, naročito pri većim zastojsima u tunelu) i montiraju se na način koji je podestan za njihovu eksploataciju i remont prilikom kvara. Nijesu podložne koroziji i trpe udare vjetra, imaju stepen zaštite IP65.

- Sigurnosno osvjetljenje

U svim tunelima poželjno je da se snadbijevanje električnom energijom vrši sa dvije strane. Tako se stvara dvostruko napajanje od kojeg jedno koristimo kao osnovno napajanje svih elemenata tunelske opreme a drugo služi kao rezerva, u slučaju ispada osnovnog napajanja. Kao dodatno obezbjeđenje za sigurnosno osvjetljenje koje osigurava minimalno dopušteno osvjetljenje u tunelu, postavljaju se dizelelektrični agregati. U slučaju ispada mrežnog napona automatski startuje dizel agregat i sigurnosno svjetlo se pali za veoma kratko vrijeme.

Izvodi se i posebno osvjetljenje instalacijom svjetiljki sa ugrađenim akumulatorskim baterijama. Postavljaju se na visinu od oko 1m, na međusobnom rastojanju 25m. Uključuju se odmah pri nestanku mrežnog napona sa rezervnog izvora, dok još nije startovalo sigurnosno osvjetljenje. U normalnom režimu rada oba osvjetljenja su u radnoj funkciji.

- Putevi za evakuaciju iz tunela

U slučaju neke veće havarije, kao i u slučaju požara, učesnici u sobračaju moraju napustiti vozila i sigurno se udaljiti iz tunela, bez projave panike. Na zidovima tunela postavljaju se oznake za ukazivanje pozicije i smjera najbližeg izlaza za pješake, koji je izdvojen posebnim tunelskim nišama. Oznake puteva evakuacije postavljaju se na zidovima tunela na visini između 80 i 120cm u odnosu na trotoar, a na međusobnom rastojanju do 50m. Svjetiljke za evakuaciju imaju u sebi obavezno ugrađenu akumulatorsku

bateriju kao izvor sigurnosnog napajanja. Dodatno se, između ovih svjetiljki, postavljaju i fotoluminiscentne oznake za sigurnije kretanje putnika.

+-

2.3 Primjena LED izvora svjetlosti u tunelskom osvjetljenju

Na par ilustracija daćemo uvid za primjenu LED izvora svjetla u sklopu realizacije projekata rasvjete pojedinih tunela.

1. Kao jedna od prvih realizacija tunelske rasvjete sa LED izvorima svjetlosti imamo tunel Vijenac - 1 Mart koji se nalazi na koridoru Vc u Bosni i Hercegovini (slika 15).



Slika 15. LED tehnologije u tunelskom osvjetljenju- tunel Vijenac - 1 Mart, Bosna i Hercegovina [5]

2. Primena LED tehnologije u tunelskom osvjetljenju na istom koridoru Vc, kao i za tunel 1 Mart (Slika15) u Bosni i Hercegovini za tunel Suhodol – 24 Novembar prikazana je slikom 16.



Slika 16. LED realizacija u regionu Tunel 24 Novembar na koridoru Vc, BiH [5]

3. Primena LED tehnologije u tunelskom osvjetljenju tunela Euroasia – Istanbul, Turska

Turska je država koja se prostire na dva kontinenta. Na takvom je mjestu i njen glavni grad Istanbul. Ideja o povezivanju zapadnog, evropskog dijela grada sa istočnim, azijskim dijelom potiče još iz 1997. godine. Nimalo lak i zahtijevan zadatak je postavljen pred grupu najpoznatijih inženjera i ekonomista Istanbula. Napravljena je studija izvodljivosti sa pripadajućim biznis planom. Prema ovoj studiji tunel preko Bosfora 2003. je preporučen za prelaz putnika sa jedne na drugu stranu.



Slika 17. Prestižan projekat osvjetljenja tunela Euroasia – Istanbul, Turska [5]

Tunel **Euroazija** je otvoren za promet putnika i robe 20.12.2016. godine.

Tunel **Euroazija** je ukupne dužine 5km. Tunelska cijev prolazi površinom morskog dna, komplet u vodenom okruženju. Najveća dubina u kojoj se tunel nalazi iznosi 106 metara. Vrijeme koje je potrebno za prelazak sa jednog kontinenta na drugi iznosi 5 minuta.

Izgradnja tunela dugog pet kilometara, na dva nivoa (Slika18) počela je u februaru 2011. godine. Tunel je izgrađen sa po dvije saobraćajne trake u oba smjera. Zbog bezbjedonosnih razloga i udobnosti koje putovanje kroz tunel pruža putnicima, brzna kretanja vozila je ograničena na 70 km/h.



Slika 18. Prestižan projekat tunela na dva nivoa , tunel Euroasia – Istanbul, Turska [5]

Područje oko Istanbula je podliježno zemljotresima, nalazi se na seizmički aktivnom području. Radi sigurnosti upriličkom eksploatacije tunela, računajući na moguće potrese inženjeri su se prilikom same izrade obezbjedili od posledica takve pojave. Naime, tunel u sebi sadrži dva fleksibilna pokretna seizmička zglobova. Tunel trpi eventualni potres od 7,25 stepena.

Biznis planom i sagledanom statistikom u prvih nekoliko godina eksploatacije tunela, predviđa se da će se ovim tunelom u budućnosti, samo u toku dana, obavljati promet od 120 000 vozila.

3. Primjena LED tehnologije i savremeni sistemi upravljanja rasvjetom – mogućnost uštede u poređenju sa konvencionalnim sistemima

3.1 Osnovne karakteristike LED izvora svjetlosti

LED lampe su danas našle upotrebu u mnogim sferama ljudskih aktivnosti gdje je neophodna neka vrsta osvjetljenja. LED obično ima veliku pouzdanost u radu, efikasnost i sigurnost.

Svjetleće diode su se prvi put pojavile 1961. godine, a već krajem devedesetih nalaze široku primjenu u svim oblastima.

Princip rada LED počiva na pojavi optičkog zračenja u spektru čovječije vidljivosti, koje se stvara kada se kroz zonu kontakta dva poluprovodnika pusti struja (Slika 19). Spektar koji emituje dioda je veoma uzak. Vezan je isključivo za tip i hemijski sastav poluprovodnika.

Za neprekidan i dugotrajan rad LED izvora treba obezbijediti konstantnu struju u strogo određenim granicama. Za napajanje LED koristi se jednosmjerna struja. Kolo koje stabilše i ispravlja naizmjeničnu struju na zadatu vrijednost naziva se drajver.

Drajveri se dizajniraju za različite snage, mogu biti linearni ili impulsni, sa ili bez kućišta.



Slika 19. Pojava optičkog zračenja na PN spoju [9]

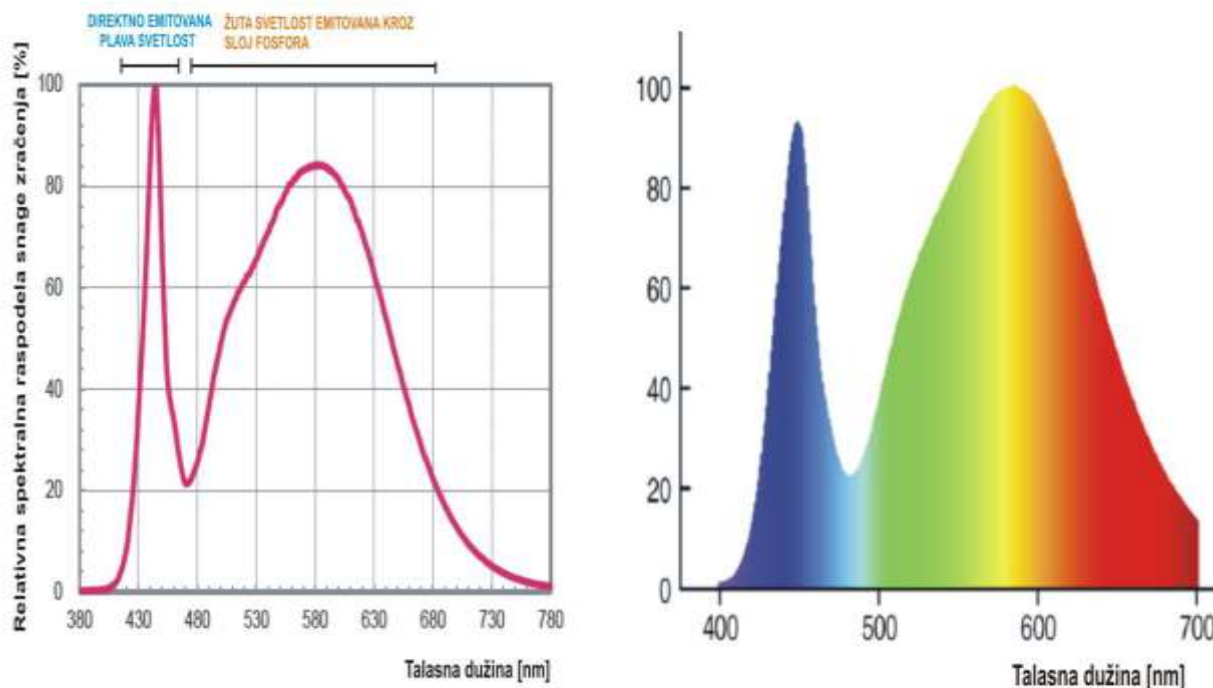
a) Dat je izgled poprečnog presjeka bijele diode. Plava boja prolaskom kroz sloj fosfora se konvertuje u bijelu,

b) Usled pojave napona na PN spoju dolazi do rekombinacije elektrona i šupljina u PN spoju. Tada se oslobađaju „plavi“ fotoni,

c) Kada „plavi“ fotoni prođu kroz sloj fosfora konvertuju se u „žute“ fotone, ili prođu bez promjene,

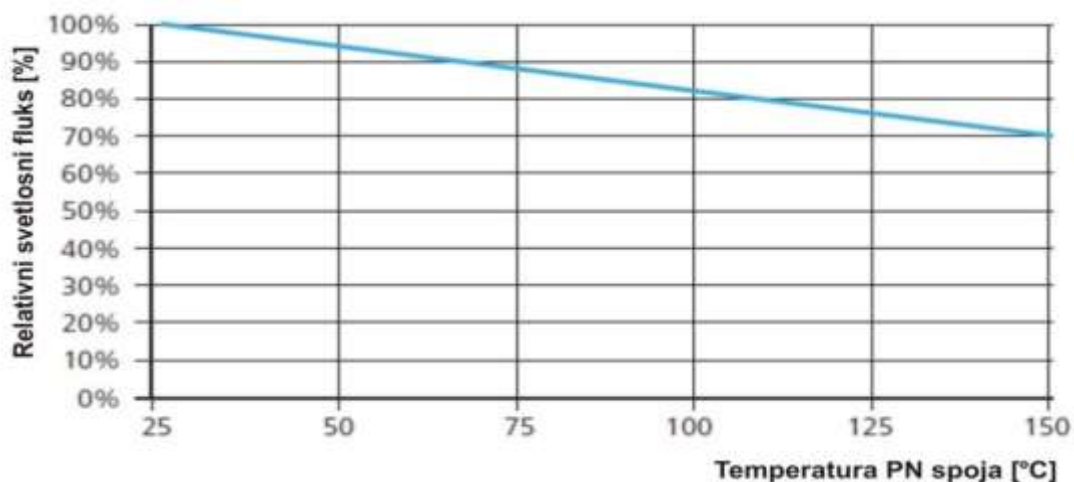
d) Ovako stvoreni „plavi“ i „žuti“ fotoni zajedno formiraju bijelu svjetlost.

Na slici 20, kao i slici 21 imamo krivu relativne raspodjele snaga zračenja bijele LED u odnosu na talasnu dužinu. Prvi dio spektra stvoren je od strane fotona koji su direktno emitovani i prošli kroz sloj fosfora bez rekombinacije. Drugi dio snage inicijalnog zračenja čipa napušta LED čip, ali ga apsorbuje fosfor i ponovo emituje, ali sada u oblasti manjih energetske vrijednosti.



Slika 20. i slika 21. **Grafik relativne raspodjele snage bijele LED** [9]

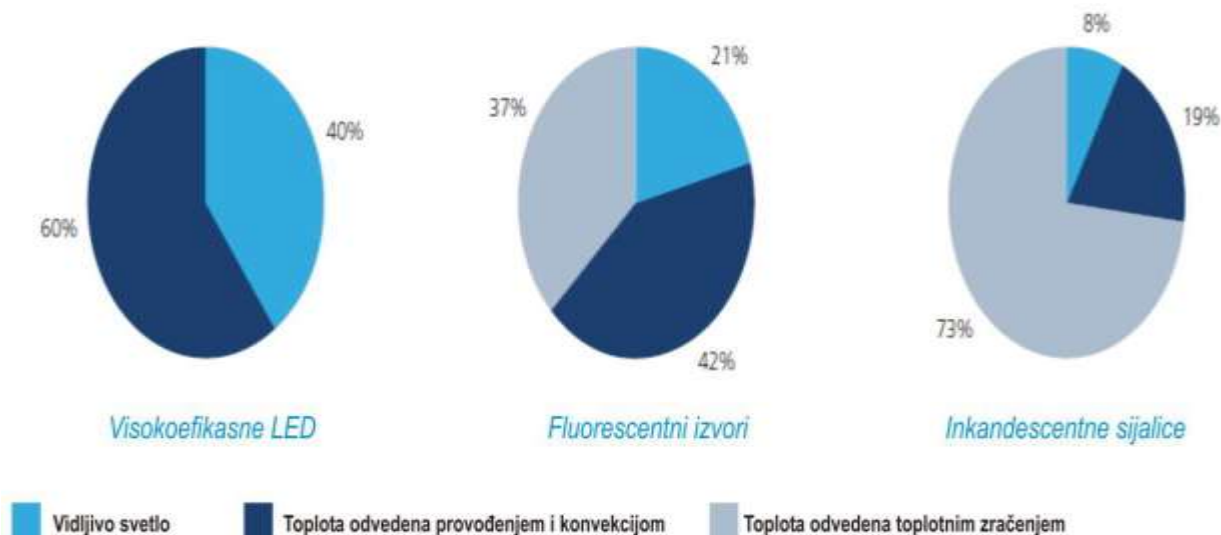
Prilikom stavljanja diode pod napon dolazi do proticanja struje kroz diodu. Kao posljedica, uz već neku temperaturu ambijenta, pojavljuje se temperatura na samom PN spoju. Vrijednost svjetlosnog fluksa opada sa porastom temperature koja se stvara na spoju (slika 22).



Slika 22. **Relativni svjetlosni fluks u zavisnosti od temperature PN spoja** [9]

Sa porastom struje kroz diodu povećava se i temperatura PN spoja. Ako raste temperatura na spoju tada moramo reagovati i na neki način smanjiti struju kroz spoj. Pribjegava se ugradnji termistora sa negativnim temperaturnim koeficijentom, koji će posredno dati informaciju LED drajveru o vrijednosti prekoračenja temperature. Tada drajver ili isključuje LED izvor ili obara struju kroz njega. Vrijednost temperature PN spoja se mora održavati u zadatim granicama. Ovakav grafik, koji prikazuje zavisnost fluksa prema trenutnoj temperaturi na spoju, je izuzetno važan podatak.

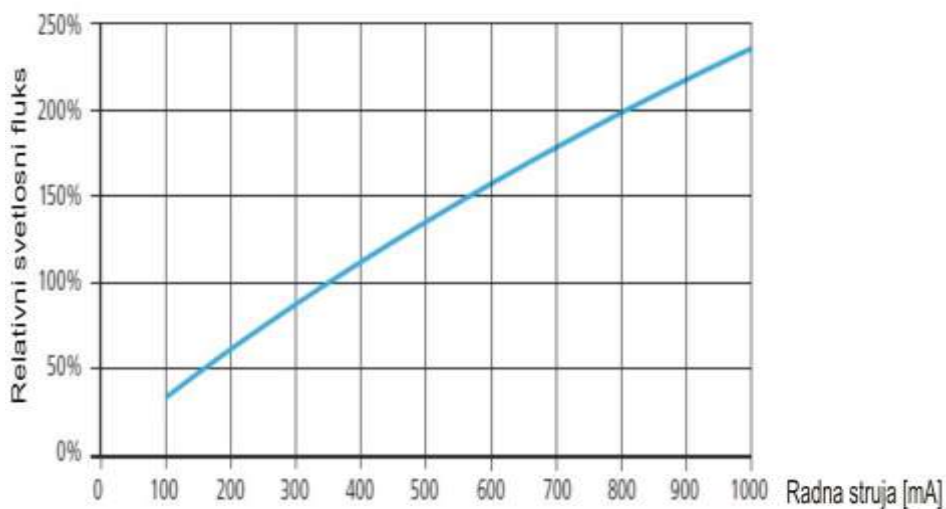
Ako se posmatra učinkovitost izvora svjetla doći ćemo do podatka da se kod LED izvora u vidljivo svjetlo pretvara oko 40% ukupne energije, kod fluorescentnih 21%, a kod inkandescentnih samo nekih 8%. Preostali dio energije se pretvara u toplotu koja se odvodi ili putem zračenja, ili provođenjem i konvekcijom (slika 23).



Slika 23. Raspodjela ukupne energije kod raznih izvora svjetlosti [9]

Temperatura PN spoja, pa samim tim uopšteno temperatura LED predstavlja važan činilac u dizajniranju svetiljke. Ona je jedan od najvećih problema koji zahtijeva i primjenu adekvatnih rešenja u LED tehnologiji [9].

Porastom struje kroz PN spoj stvara se veći broj fotona koji emituju svjetlost. Znači da je svjetlosni fluks proporcionalan sa radnom strujom. Ova zavisnost nije predstavljena kao linearna funkcija u cjelini (slika 24).



Slika 24. Svjetlosni fluks LED u funkciji radne struje [9]

Manja nelinearnost ove funkcije je posledica tzv. „*droop*“ fenomena: svjetlosna efikasnost LED se smanjuje sa porastom inteziteta radne struje. Ovo znači da se, za unaprijed definisanu nominalnu struju, smanjenjem struje postiže veća svjetlosna efikasnost. Ova osobina se obavezno koristi prilikom dimovanja svetiljki.

3.2 Prednosti postignute upotrebom LED prema upotrebi HID izvora svjetlosti

LED rasvjeta je već duže vrijeme preuzela dominaciju u dekorativnom i u uličnom osvjetljenju. U današnje vrijeme sve više se projektnim zadatkom za rasvjetu tunela insistira na LED tehnologiji. U cilju ekonomije električne energije, mogućnosti lakšeg upravljanja i nadzora tražimo dominaciju LED izvora nad konvencionalnim HID (HighintensityDischarge) izvorima.

Efikasnost LED izvora svjetlosti je vrijednost koja predstavlja odnos svjetlosnog fluksa kojeg stvara izvor svjetla i njegove električne snage na ulazu. Svjetlosna iskoristljivost raste iz dana u dan. Ako sagledamo zbirnu efikasnost svetiljke koju pojedinačno stvaraju svi njeni elementi LED svetiljke imaju energetska efikasnost veću u odnosu na svetiljku sa natrijumom visokog pritiska. Ova činjenica bazirana je na tome da se 40% ukupne energije pretvori u svjetlost a 60% ide na toplotu. U poređenju sa ostalim izvorima, ovaj podatak nam daje za pravo da implementacijom ovih izvora u sistem osvjetljenja postignemo značajne uštede u potrošnji i samim tim plaćamo manje račune za potrošenu energiju.

Regulacija jačine svjetlosti može se vršiti preko LED dimera. LED izvori su dimabilni. Samim tim, ako dobro isprojektujemo sistem osvjetljenja, napravimo pravilnu regulaciju i ostvarimo pouzdano upravljanje, možemo postići dodatnu uštedu u potrošnji energije, koja ide čak i do 30% u odnosu na sisteme koji su do sada postojali.

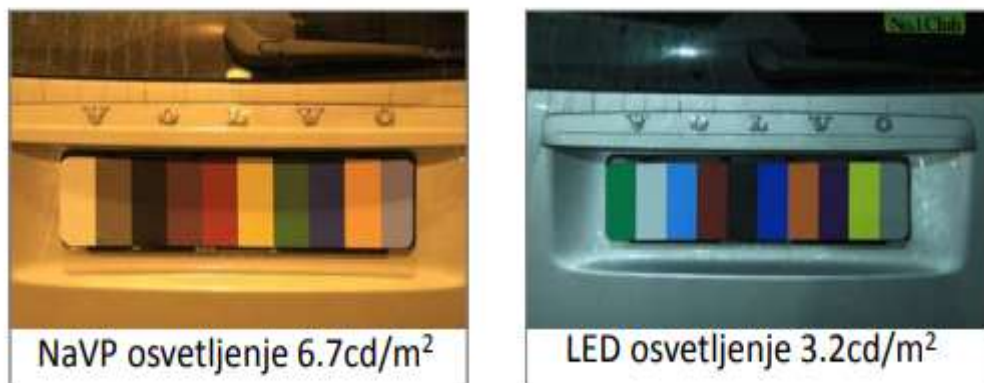
Nivo struje na led čipu je strogo kontrolisan, samim tim kod LED diode imaju malu proizvodnju toplote, pa se i malo zagrijavaju tokom rada. Znači, upotreba LED sa stanovišta **požarne sigurnosti** je veoma pogodna.

Prilikom stavljanja LED izvora pod napon on startuje istog momenta. **Trenutan odziv** LED izvora je i kod komandi za upravljanje i izvršenje promjene nivoa svjetla, tj. dimovanja. Kada je u pitanju izvor na visokog pritiska sam njegov start se dešava u periodu između pet i deset minuta, kada postiže nominalnu vrijednost fluksa (usled razgorjevanja izvora).

Široku primjenu u LED osvjetljenju imaju RGB lampe. Oznaka lampe potiče od: R red – crvena, G green – zelena, B blue – plava.

Ako upravljamo svakom od boja ponaosob, kombinacijom nekih od ove tri boje možemo dobiti sve ostale. Povećavajući ili smanjujući udio neke od osnovnih boja dobijamo i sve ostale nijanse koje tražimo. Ovakvo svojstvo RGB lampi nam daje mogućnost da primjenjujemo LED rasvjetu kod mnogih posebnih i specifičnih potrošača.

Stepen usklajđenosti boja za LED i NaVP



Slika 25. Stepen usklajđenosti boja kod NaVP i LED [9]

Kod kvaliteta osvjetljenja vrlo je važan **indeks prikaza boja**. To je mjerna metoda. Znači računski je izvedena. Upoređuje boju kada uporedi standardnim izvorom svjetlosti sa bojom pri vještačkom izvoru svjetlosti.

Postoji 14 uzoraka usko specificiranih boja koje služe za upoređivanje osvjetljaja.

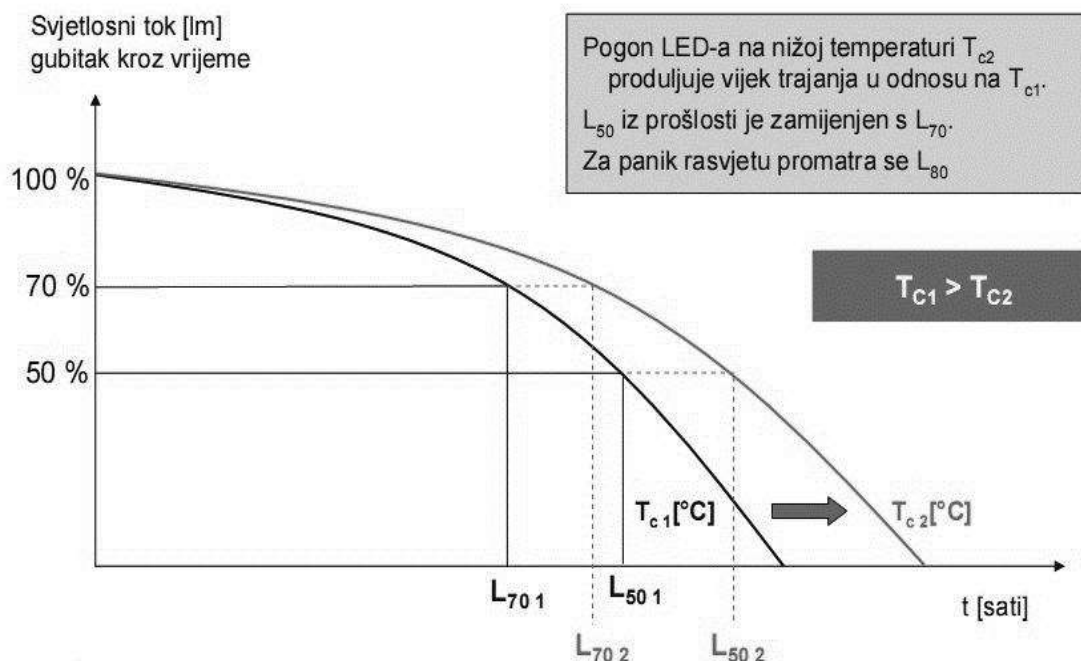
Kod LED, pri osvjetljaju $3,2 \text{ cd/m}^2$ boje su prepoznate 90%, a kod NaVP imamo 89% prepoznatljivosti pri osvjetljaju $5,7 \text{ cd/m}^2$ (slika 25).

Prikaz boja utiče i na blagovremeno uočavanje prepreka na putu.

U svim distributivnim mrežama dolazi do pojave raznih harmonika koji utiču na veličinu mrežnog napona. LED drajveri rade u opsegu 120-280 VAC i vrlo su kvalitetni po izgradnji. Zato promjene i **fluktuacije mrežnog napona** ne utiču puno na ispravnost rada LED izvora [9].

Životni vijek LED je mnogo veći od svetiljki sa natrijumom visokog pritiska. Životni vijek za natrijumov izvor visokog pritiska je samo 20 000 sati što je jedna petina životnog vijeka LED. Primjena ovakvih svetiljki u mnogome smanjuje troškove održavanja sistema rasvjete. Ako bi instalisane svetiljke bile u funkciji 11 sati dnevno, njihov vijek trajanja bi iznosio blizu 20 godina, kada ih treba i zamijeniti.

Što se tiče vijeka trajanja on je klasikovan od strane proizvođača oznakama L50 i L75, što označava prestanak vijeka trajanja s padom svjetlosnog fluksa na 50% odnosno 75% nazivne vrijednosti (slika 26).



Slika 26. Opadanje svjetlosnog fluksa tokom vremena [9]

Svjetlosni izvor je pogodan za upotrebu dok emituje odgovarajuću jačinu svjetlosnog fluksa. Svjetlosni fluks opada tokom vremena. Njegova polazna vrijednost definiše se kao nominalna. Tokom eksploatacije izvora svjetla ta vrijednost sa vremenom opada. Kada svjetlosni fluks, idući opadajućom funkcijom postigne 50% početne vrijednosti možemo smatrati da se i životni vijek datog izvora svijetla završio (slika 26). Ponekad može da se desi da čip pregori. To bi se dogodilo kod pojave nekih struja kratkog spoja ili pojave nekih velikih prenapona u mreži.

Oznaka L50 označava da je svjetlosni fluks pao na 50% nominalne vrijednosti. Tada se završava vijek trajanja izvora. Ova vrijednost je dodijeljena od strane proizvođača. Isto važi za oznaku L75 (fluks opada na 75% vrijednosti nominalnog fluksa).

Temperatura ambijenta u kojem se nalazi izvor je vrlo bitan parametar (obično se uzima vrijednost 25°C). Sa grafika se vidi da fluks brže opada pri većim temperaturama (slika 26 – temperature okoline T_{c1} i T_{c2}), a samim tim smanjuje se životni vijek izvora. Ako bi LED izvor svijetla radio stalno pri temperaturi za 10% višoj od predviđene životni vijek se umanjio za polovinu.

Možemo iskoristiti činjenicu da **svjetlosni fluks raste pri padu temperature**. Maksimalni fluks se postiže na temperaturi ambijenta od -30°C . Ovakav scenario se koristi za primjenu LED kod rasvjete hladnjača, komora, zamrzivača i slično.

LED izvori svjetla čine poluprovodnici, ne sadrže neke od otrovnih za ljude metala, kao što su cink ili živa (luminiscentni ili halogeni izvori svjetla). Njihov rad, iznenadne havarije, prinudno odlaganje, otpad ili skladištenje ne predstavljaju prijetnju po potrošače niti štete životnoj sredini. Potpuno su **ekološki prihvatljivi**.

Zbog specifičnosti procesa stvaranja svjetla ovi izvori su gabaritno mali i mala im je ukupna težina. Formiranjem u posebnoj izvedbi više izvora svjetla dobićemo uređaj sa koncentrisanim svjetlosnim fluksom. To su reflektori i oni imaju malu potrošnju električne energije uz mogućnost formiranja jakog svjetlosnog snopa. Mali su po gabaritu, male su i težine. Ovo svojstvo daje korisniku

prednost za njihovu ugradnju u **lakoj i pogodnoj eksploataciji**. Lakša je montaža, remont i samo održavanje sistema rasvjete.

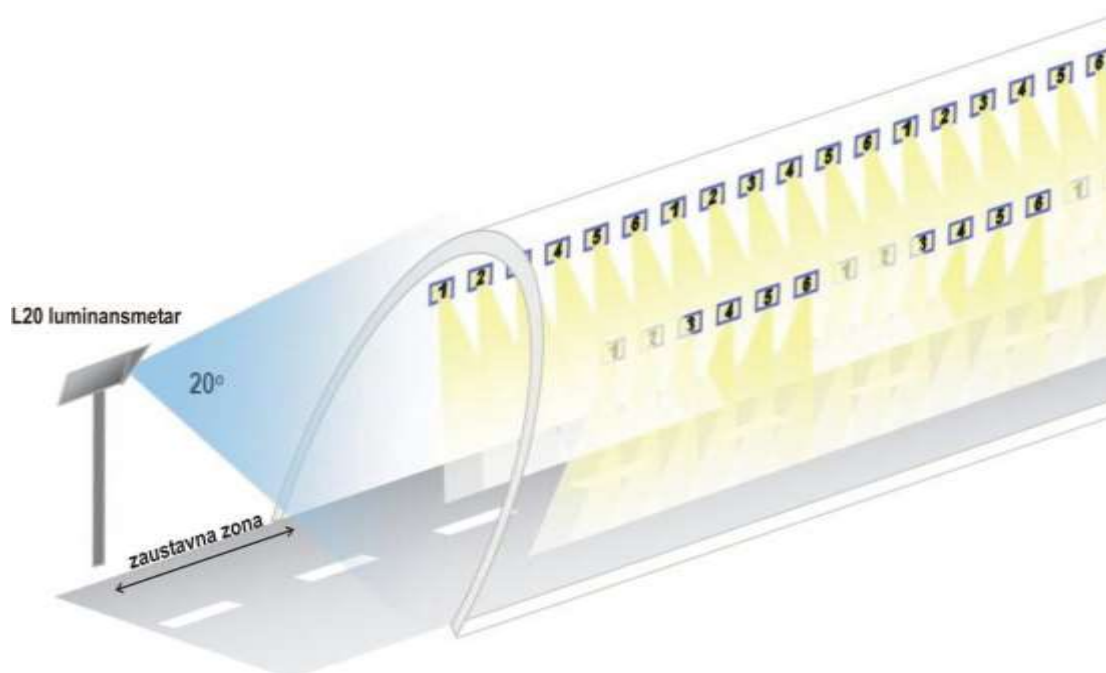
Moramo imati u vidu da se 19% električne energije na nivou cijelog svijeta troši na rasvjetu. Intenzivno se radi na uvođenju novih visoko energetske efikasne izvora svjetlosti, a LED je tu daleko najbolje rješenje [9].

3.3 Arhitektura i pregled osnovnih tipova tunelskih sistema za upravljanje rasvjetom

Kada je riječ o tunelskoj kontroli ona nije standardizovana. Razni proizvođači koriste različite protokole koji služe za upravljanje rasvjetom. Svaki projektni zadatak postavlja različite uslove za regulaciju nivoa osvjjetljenja i načina upravljanja i kontrole. Neki od investitora opredjeljuje samo minimum zatijeva, funkciju prostog uključivanja ili isključenja određenih strujnih krugova. Neki žele imati dojavu kvara za tačno opredjeljenu poziciju, žele kontrolisati temperaturu i broj radnih sati svjetiljke, regulisati svjetlosni fluks. Protokoli koji se koriste mogu biti otvorenog ili zatvorenog tipa u odnosu na drugu službu održavanja tunelske rasvjete ili drugog proizvođača svjetiljki.

Kada se hoće uprostiti način izvršenja kontrole, ograničiti broj kontrolnih funkcija na minimum, rješavanju zadatka pristupamo jednostavno. Pomoću korišćenja programabilnih tajmera i kontaktora uključujemo ili isključujemo određene strujne krugove. Pri tome nema nikakve regulacije nivoa fluksa. Ovakva kontrola se izvršava svakoga dana na isti način. U ovome slučaju svi ostali podaci se ne uključuju u projektni zadatak. Ne postoji informacija o vremenskim prilikama, nivou sjajnosti na neposrednom ulasku u tunel.

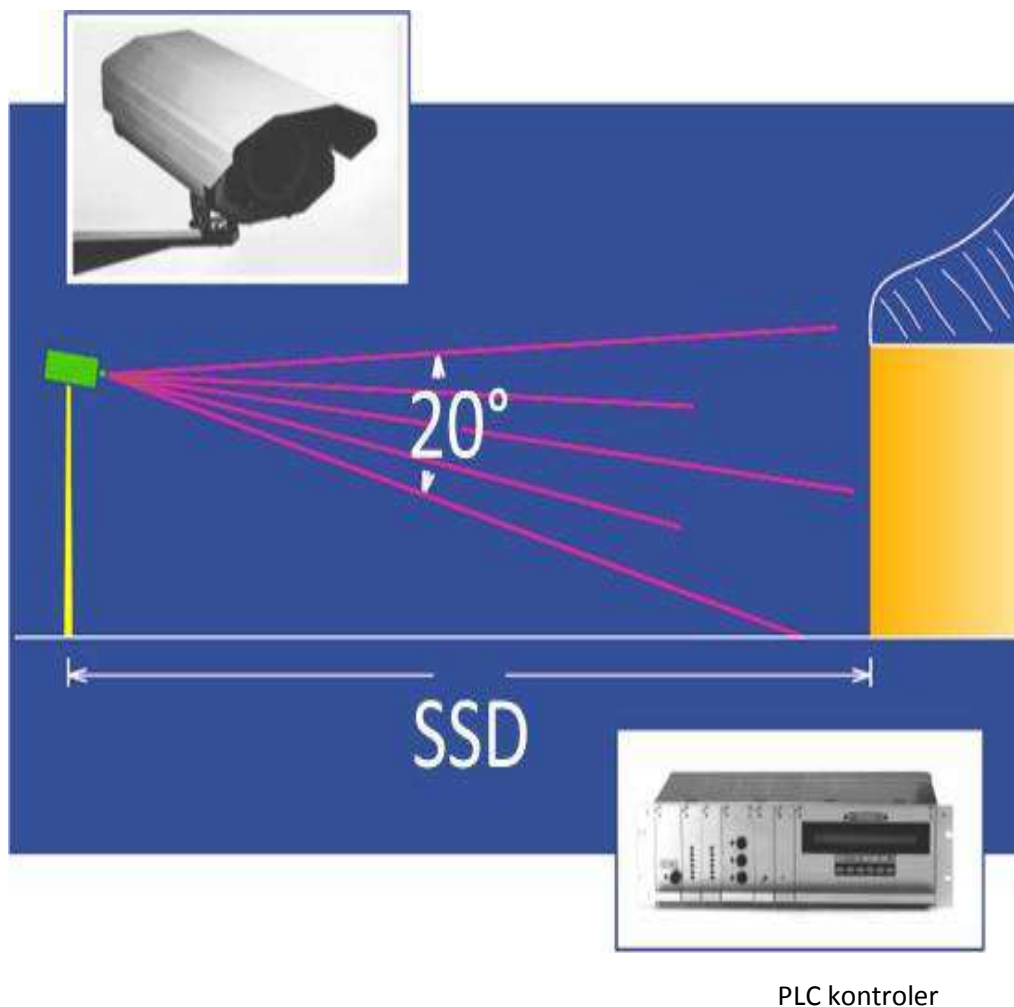
Nema prave kontrole bez one koja pri projektovanju sistema ne uzima sve bitne parametre kojima je određen nivo sjajnosti u tunelu. Uvažavajući činjenicu da se mora obezbijediti bezbjedan ulaz u tunel vozaču, kao i da se obezbijedi udobna i sigurna dalja vožnja, moraju se tretirati promjene u sjajnosti ulaznog portala u tunel koja zavisi direktno od dnevnih promjena sjajnosti okolnog neba. Za tu svrhu, na stubu ispred tunela, na dužini koja obezbjeđuje bezbjedno zaustavljanje vozila, postavlja se luminansmetar (slika 27). To je tzv. L20 kamera i ona predstavlja glavnu (osnovnu) jedinicu kontrolnog sistema. Nivo sjajnosti prilazne zone je prvi ulazni parametar na osnovu kojeg se vrše svi ostali proračuni za odabir svih parametara sistema i projektovanje tunelske rasvjete.



Slika 27. Način postavljanja luminansmetra – kamere L_{20} [12]


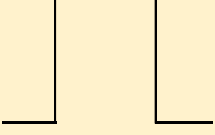

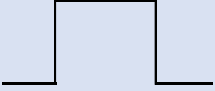
Prilikom kretanja po putu širina vidnog polja vozača iznosi 20° u vidokrugu. Da bi se bezbjedno zaustavio u slučaju neke smetnje ili pojavljivanja neke eventualne prepreke, za vozača uz adekvatno projektansko rješenje počinju da važe svi uslovi za vožnju kroz tunel. U tom trenutku, tehnički gledano, L_{20} kamera u stvari simulira ono što vidi oko vozača. Kamera bi trebalo da se postavi na visinu jednaku visini očiju vozača u motornom vozilu. U praksi, iz bezbjedonosnih razloga, kamera se postavlja na veću visinu, na stubu sa desne strane vozačevog kretanja.

Objektiv samog luminansmetra se smatra početkom kupe iz kojeg se prostire vidno polje konusnog oblika. Kamera se pozicionira tako da se centar kamere usmjerava na centar samog ulaska u tunel (slika 28).

Slika 28. Pozicija L₂₀ kamere [13]

Sva oprema koja je sadržana u tunelu i oko tunela komunikacijskom mrežom je povezana sa centralnim sistemom iz kojeg se vrši nadzor i upravljanje. Podatak za L₂₀ se prosleđuje PLC kontroleru koji daje komande za rad pojedinih strujnih krugova.

Osnovni problem koji treba riješiti adekvatnim tunelskim osvjetljenjem je kako riješiti bezbjedonosne probleme prilikom adaptacije vozačevog oka na nagle promjene sjajnosti prilikom ulaska u tunel ili prilikom izlaska iz tunela. Ako su atmosferske prilike takve da je sunce napolju imaćemo visoku sjajnost u unutrašnjosti tunela. Ako vani preovladava oblačno ili kišovito vrijeme nivo sjajnosti u unutrašnjosti tunela je nizak (slika 29).

IZVAN TUNELA		UNUTRAŠNJI DIO ULAZA U TUNEL
	jarko sunce napolju	visoka sjajnost u unutrašnjosti 
	napolju oblačno	niska sjajnost u unutrašnjosti 

Slika 29. Princip izbora nivoa sjajnosti u tunelu [14]

Različiti su zadaci koji se postvljaju za regulaciju nivoa osvjetljenja i sam način upravljanja rasvjetom. Zahtijevano projektansko rješenje može da sadrži minimum zatijeva. Oni mogu rasti do zadavanja određenih složenih funkcija koje razni algoritmi rješavaju.

Prema obimu i vrstii zahtijeva sistemi kontrole tunelke rasvjete mogu se podijeliti na:

- 1) Autonomnu („STAND-ALONE“) kontrolu i tada nemamo nikakvih komunikacija prilikom kontrole rasvjete,
- 2) Osnovnu kontrolu u kojoj imamo komunikaciju u jednom smjeru. Sabiraju se parametri i zadaju komande za upravljanje i za regulaciju rasvjete,
- 3) Napredna kontrola, koja se dobijakad se integracija vrši između više segmenata u tunelskom sistemu a nadzor vrši sa jednoga mjesta.

3.4 1) Autonomna kontrola bez komunikacije

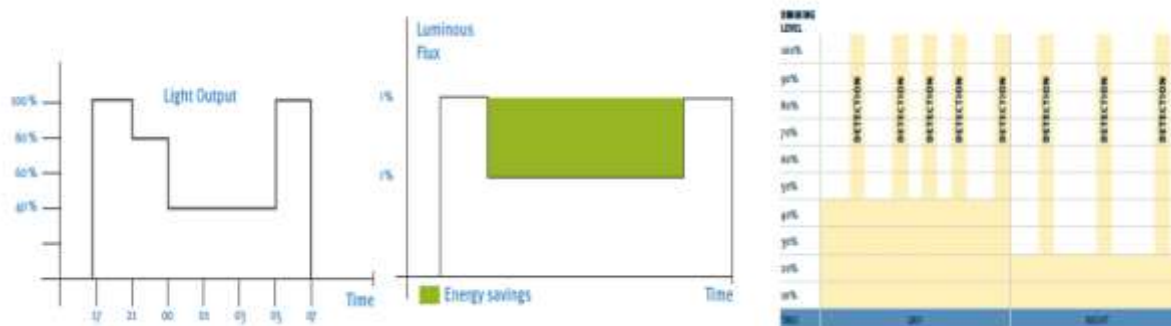
Ako se opredjelimo za minimum zahtijeva u kontroli tunelske rasvjete tada troškove izvođenja same instalacije svodimo takođe na minimum. Od korisnika se zahtijeva samo uključenje ili isključenje određenih strujnih krugova. U današnje vrijeme LED svetiljka se pravi sa ugrađenim u sebi drajverom. Oni su sastavni dio svetiljke i opreme za tunele. Prave se na način što su programibilni i izvode se tako da imaju mogućnost visestepenog dimovanja. Najčešća izvedba je pet stepeni dimovanja. Rad ovih drajvera je samostalan i nema nikakvu povezanost sa udaljenim prenosom informacija.

Kod autonomne kontrole postoje dva načina, dvije opcije za start , uključenje rasvjete.

Prvi način je „time based“ opcija. Sistem se stavlja u funkciju momentom uključjenja i tada svetiljke dolaze pod napon. Taj momenat se uzima za polaznu tačku. Drajveri imaju pet stepeni mogućnosti dimovanja i sa njima se startuje sa uključjenjem i isključenjem rasvjete u programiranih pet stepeni rada (slika30).

Ako se u strujno kolo ubaci astronomski sat koji će dati komandu za uključenje početka dimovanja rasvjete, tada se za početak dimovanja uzima „sredina noći“.

Programibilni drajveri u LED svjetilkama imaju izvedbu sa „override“ opcijom. U električno ovakvog drajvera imamo mogućnost uključanja prisutnost informacije koju daje senzor pokreta ili fotoćelija koja reaguje na sjajnost okruženja.



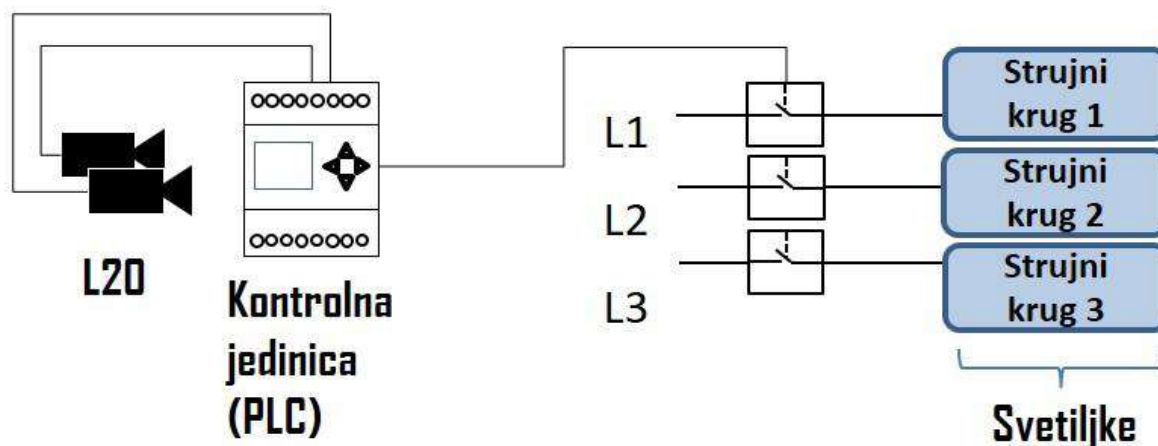
Slika 30. Autonomna kontrola: višestepena, dvostepena i regulacija sa povratkom na osnovni režim rada usled dojava signala nekog od senzora [14]

Ako se koristi „override“ funkcija tada koristimo i „**hold time**“ opciju. To znači, da će, poslije dobijanja informacije sa senzora na drajver, biti definisan vremenski period u kojem se svjetiljke nalaza u novom stepenu dimovanja, Po isteku tog vremena, jer se smatra da nema više potrebe za uključenim senzorima pokreta ili senzorima sjajnosti, sistem se vraća na nominalni režim rada (slika30).

3.4 2) Osnovna kontrola sa jednosmjernom komunikacijom

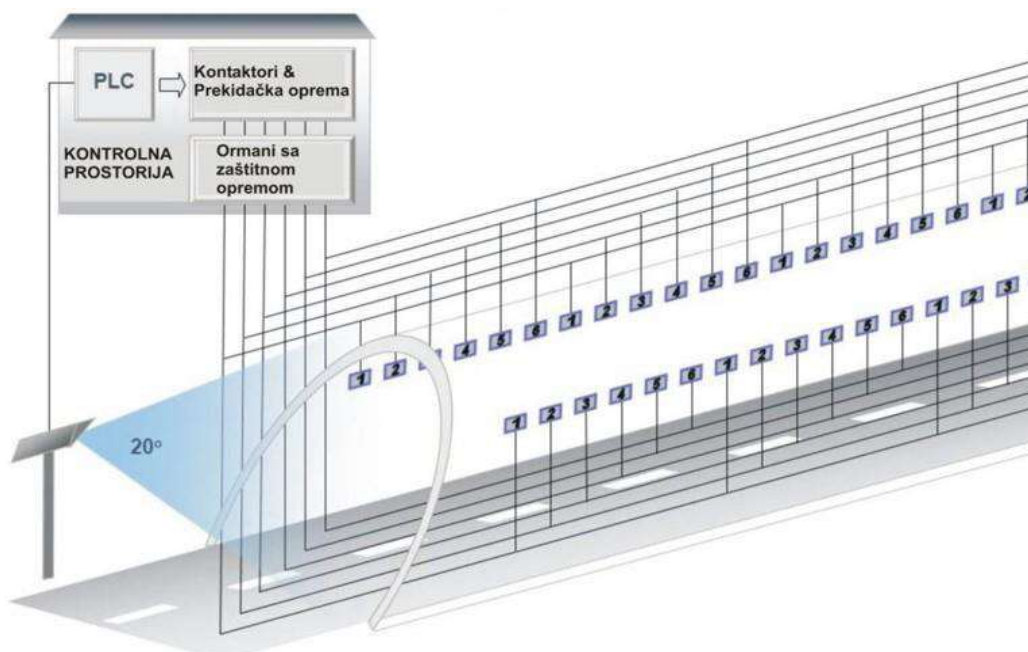
Prilikom projektovanja sistema tunelke rasvjete, poštujući rezultate fotometrijskih proračuna svjetiljke u tunelu razdvajamo po zasebnim strujnim krugovima. Znači u jednoj petlji imamo više svjetiljki koje su redno vezane. Kombinacijom uključanja više određenih strujnih krugova dobijaćemo i različite nivoe osvjetljenja u pojedinim zonama tunela. Kod rasvjete tunela imamo osnovni bazni dnevni i noćni režim, a ostali režimi su režimi u kojima je u pogonu 25% rasvjetnih tijela, zatim slijede režimi sa 50%, pa 75% i na kraju imamo režim od 100% pogonskog režima. Ovakva kontrola osvjetljaja podrazumjeva upravljanje grupama svjetiljki koje su u jednom strujnom krugu. Znači, radi se o isključivo jednosmjernoj komunikaciji (slika 31). Povratno ne dobijamo nikakvu informaciju o bilo kakvom statusu rasvjetnih tijela u tunelu, kao i bilo koji podatak vezan za ispade, nivo napona i struje kroz potrošače i slično.

Regulaciju osvjetljenja možemo vršiti prostim **uključenjem ili isključenjem** pojedinačnih strujnih krugova (slika 31). Ako svjetiljke u tunelu podesimo na još jedan nivo koristeći programibilni LED drajver same svjetiljke, dobićemo **dvostepenu regulaciju** (slika 32).



Slika 31. Osnovna kontrola – on/off funkcija [12]

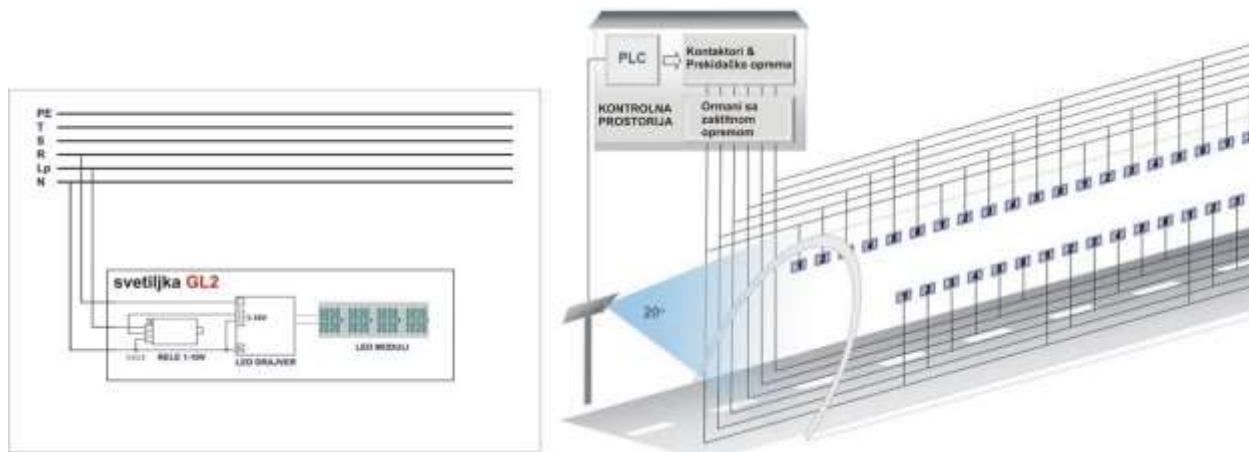
Kamera L20 preko dvožilnog kabla šalje analogne signale kontroleru, centralnoj procesorskoj jedinici (slika 32). Kontroler obrađujući te podatke, daje signal kojim uključuje ili isključuje strujni krug. Funkcija releja koji su sastavni dio opreme koja ide uz PLC je da prosto prekine ili prespoji strujni krug (tkz. prekidačka funkcija).



Slika 32. Osnovna kontrola – dvostepena regulacija [12]

Svaka LED svetiljka je opremljena i čini jednu cjelinu sa programibilnim LED drajverom. Da bi postigli dvostepenu regulaciju moramo u električno kolo svetiljke ubaciti jedan 1-10V relej (slika33). Povezuje se sa drajverom koristeći kontrolne ulaze na njemu. LED drajver i relej kod novije izvedbe

svetiljki čine jednu integrisanu cjelinu. Svetiljku dimujemo na predefinisano vrijednost ili na nominalnu vrijednost. Ako PLC da komandu da se svetiljka dimuje sa nominalne na predefinisano vrijednost imamo pozitivnu logiku, a ako je obrnut slučaj, negativnu logiku. Ovakvim vidom regulacije svjetla vršimo uštedu u električnoj energiji i poboljšavamo uslove za lakšu adaptaciju vozačevog oka.



Slika 33. Povezivanje LED svetiljke i 1-10V releja u jednu cjelinu sa programabilnim LED drajverom [12]

3.4 3) Napredna kontrola sa mogućnošću pametne integracije

Sa vremenom brzog razvoja tehnologija kontrolni sistemi postaju sve više razgranatiji, potrebni su skoro svuda.

U dosadašnjim izlaganjima imali smo samo jednosmjernu komunikaciju. Zadavali smo komandu za dimovanje, uključenje ili isključenje pojedinačnog strujnog kruga. Ako zahtijevamo da povratno dobijemo informaciju o izvršenju naredbe, statusu i ispravnosti svetiljke, stanje napona, struje, moramo obezbijediti uslove za dvosmjernu komunikaciju. Zato u takvoj svetiljci kao kompaktnoj cjelini, mora biti ugrađen tunnelski kontroler (gateway – prevodilac protoka). Preko ovoga kontrolera komuniciramo sa uređajima u opremom višeg nivoa koji formiraju svoje baze podataka.

U realizaciji sistema tunnelske kontrole prvo polazimo sa najnižeg hijerarhijskog nivoa. Komanda se zadaje drajveru da svetiljku dimuje na određeni nivo svijetla. Tunnelski kontroler (gateway) na izlaznoj strani ima ili sistem kontrole 1-10V, ili DALI. Na drugoj strani, strani ulaza, imamo potrebu da dalje komuniciramo sa kontrolerima u susjednim svetiljkama. Kada imamo takvu vrstu komunikacije nju proširujemo dalje. Komuniciramo sa PLC-om koji ima ulogu master kontrolera, to jeste koordinatora čitavog sistema tunnelske kontrole. Da bi ostvarili ovakav stepen koordinacije koriste se neke od tehnika:

- 1 - PowerLineCommunication (PLC),
- 2 - DALI protokol,
- 3 - DMX protokol,
- 4 - BUS protokoli putem RS-485 serijske komunikacije,

PowerLineCommunication (PLC) – PLC (slika 33) ima za fizičku osnovu generisanje visokofrekventnog nosača nad kojim je izvršena visokofrekventna modulacija korisnim signalom a isti se prenosi preko dalekovoda.

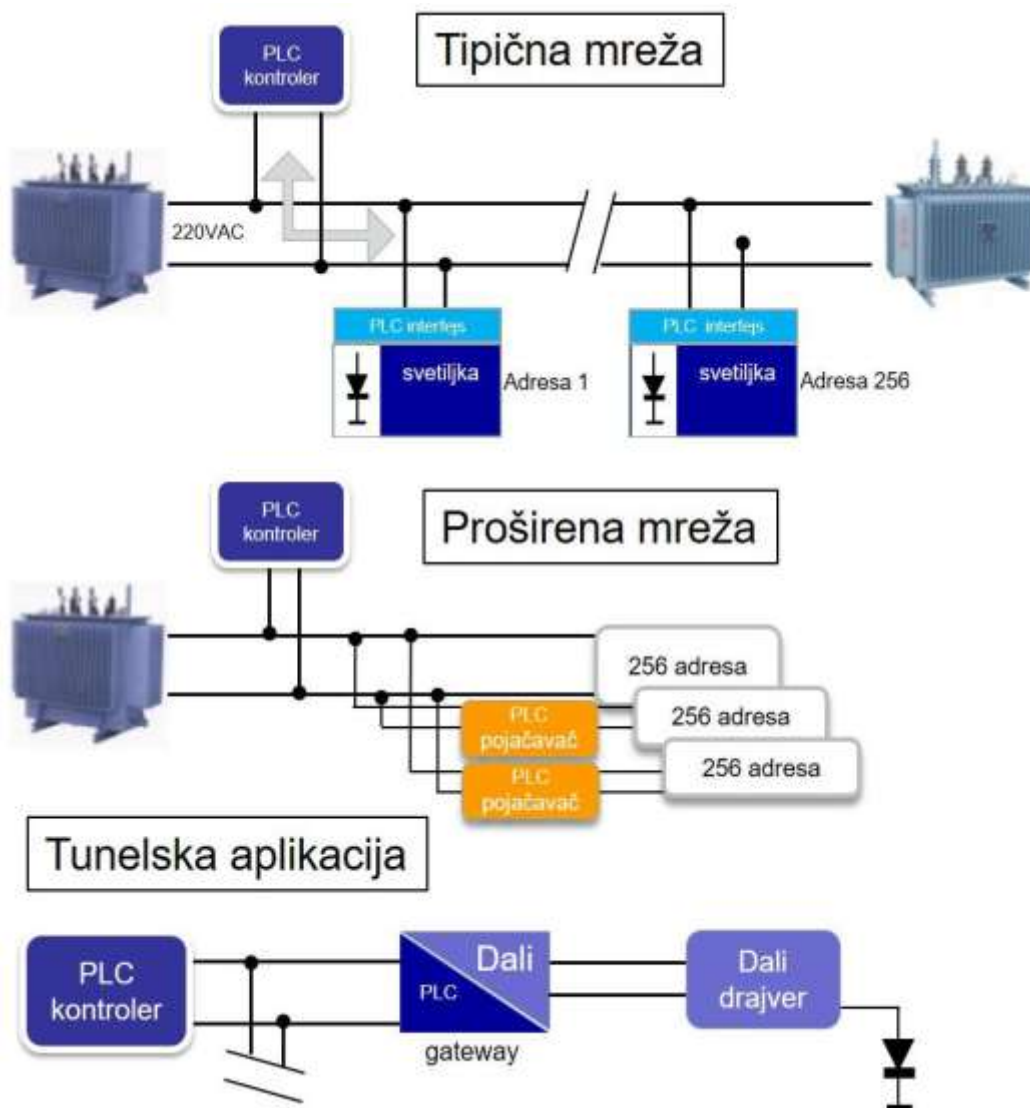
Razvojem tehnologije i društva u cjelini javila se potreba za jeftinim sredstvima komunikacije za masovnu upotrebu. Prva ideja realizovana je na ovaj način pojavila se još 1930-ih. Tada je njena realizacija našla smisao za signalizaciju na željeznici i imala je veoma nisku brzinu prenosa podataka. Sa povećanjem broja zahtijeva i potrošača pojavili su se i prateći problemi. Kada se uzmu u obzir kontrolisani elektromotori, drugi električni uređaji, došlo je do pojave smetnji i šumova u provodnicima koji nijesu zaštićeni od visokofrekventnog zračenja. Zračeci tako sav prikupljeni materijal u atmosferu električne mreže su postale antene za okolne repetitore.

Zbog dužine dalekovoda pojaviće se slabljenje signala. Taj problem rešavamo ubacivanjem repetitora u sistem. Repetitor se smiješta između brojila za potrošnju struje i uređaja za prikupljanje podataka.

Međutim, pojavom Interneta pojavilo se veliko interesovanje za prenos informacija preko elektroenergetske distributivne mreže. PLC koristi ove mreže kao fizički medijum za protok informacija. On predstavlja zbirni pojam koji sadrži u srbi sve opcije potrebne za njihov prenos. Električni provodnici od korisnika do komunikacijskog kanala su veoma kratki. Kašnjenja u liniji su mala i zato se, pri prenosu video ili audio signala razmjena signala odvija u realnom vremenu. Kod bežičnih mreža za konfiguraciju sistema nijesu potrebne žice. Ali nema se svuda dostup signalu, pa se područje pokrivanja može obezbijediti instalisanjem dodatne PLC mreže. Komunikacija preko vazduha kao medija je nezaštićena od smetnji, opseg kanala je ograničen, čime se gubi mogućnost istovremenog prenosa više audio video signala dobrog kvaliteta.

Neprekidan i dugotrajan rad LED izvora obezbijeđen je konstantnom strujom koja je ustrogo u određenim granicama, Za tu funkciju zadužen je LED drajver. On napaja LED sa jednosmjernom strujom.

Na slici 34 prikazana je jedna komunikacija u tunelskom osvjetljenju sa primjnom DALI drajvera.



Slika 34. PLC komunikacija u tunelskom osvjetljenju [17]

DALI (Digital Addressable Lighting Interface) - je protokol koji je napravljen za kontrolu rada rasvjetnih tijela.

Protokol je stvorila kompanija Tridonic iz Austrije. Primjenjeno je "Mančestersko kodiranje": svaki bit jednog podatka je kodiran sa prelaskom niskog signala u visoki signal, a isto važi za obrnut slučaj.

Digitalni adresabilni interfejs osvjetljenja je protokol koji vrši kontrolu pomoću uređaja koji su instalisani na svjetilkama (prigušnice, dimeri). On je zamijenio, u velikoj mjeri, analogni "1-10V" protokol.

DALI komunikacija je dvosmjerna komunikacija. Svaka oprema koja ga podržava komunicira po potrebi sa DALI magistralom.

DALI kontroleri obezbjeđuju dvosmjernu komunikaciju.

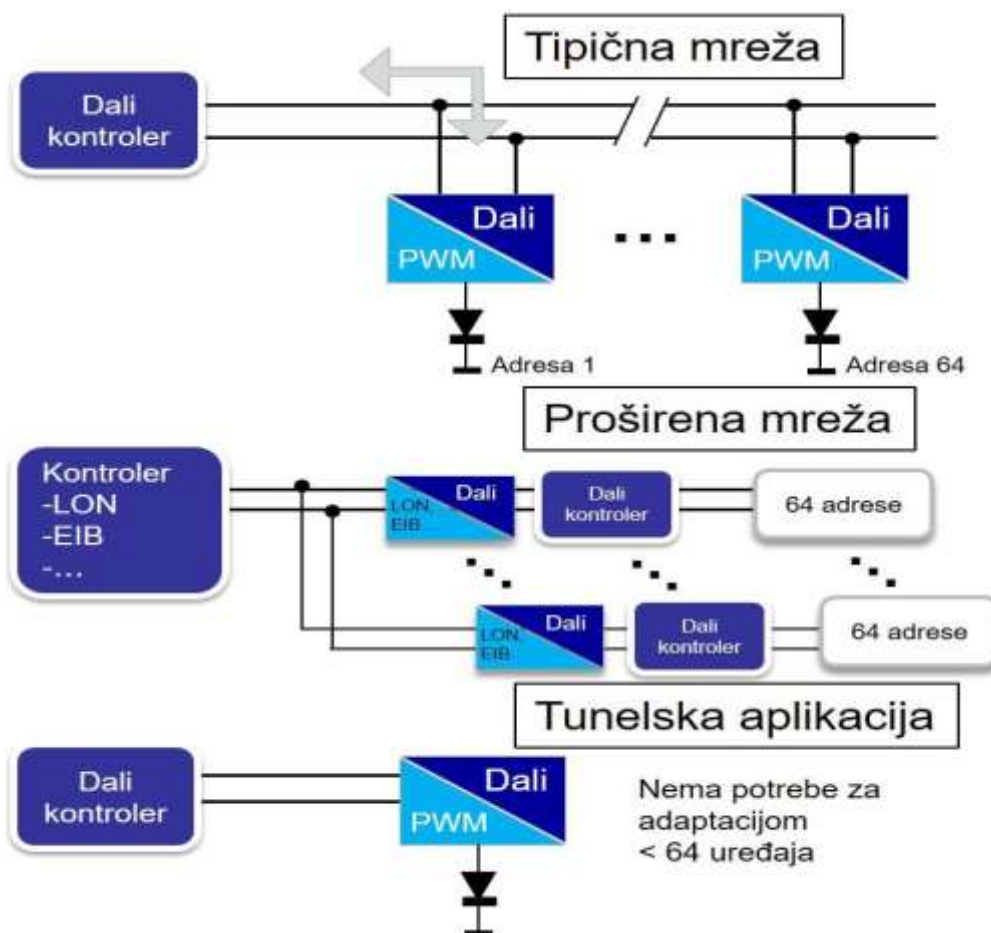
DALI sistem može da sadrži do 64 nezavisna uređaja na radu u jednoj DALI liniji.

Maksimalan broj linija koje DALI sistem može sadržati je 200.

DALI linija se može povezati sa nekim drugim sistemom preko DALI gateway-a. Bilo koja mješovita topologija mreže je dozvoljena. Nije dozvoljena topologija prstena.

Na digitalnu magistralu DALI značajno ne utiče šum jer ima veliku amplitudu korisnog signala. U strujno kolo se ne uključuje dodatni rele koji kontroliše da li je svjetiljka uključena ili ne. Ova činjenica smanjuje cijenu koštanja sistema.

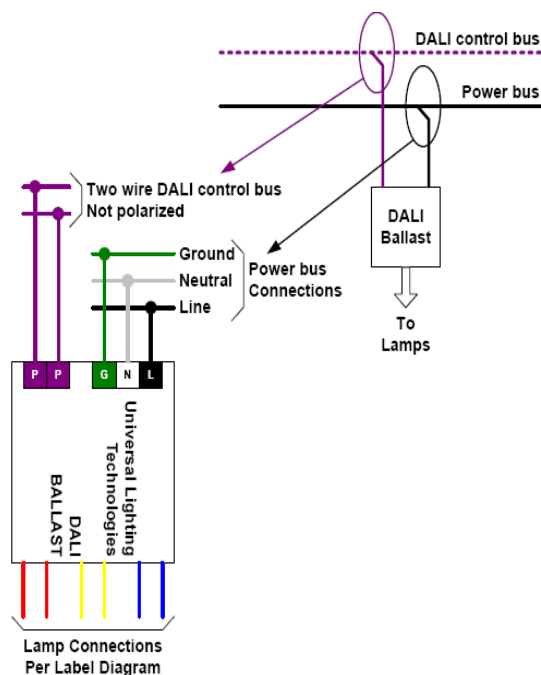
Za ovakav način kontrole tunelskog osvjetljenja interes je mali. Protokol DALI nije u mnogome razrađen i adaptiran uslovima koje treba ispuniti u tunelskom osvjetljenju. Njegova konfiguracija je prikazana na slici 35.



Slika 35. DALI komunikacija u tunelskom osvjetljenju [17]

DALI nema centralni kontroler. Svaki DALI uređaj čuva svoja podešavanja u svojoj memoriji.

Na slici 36 prikazan je šematski prikaz DALI ožičavanja.



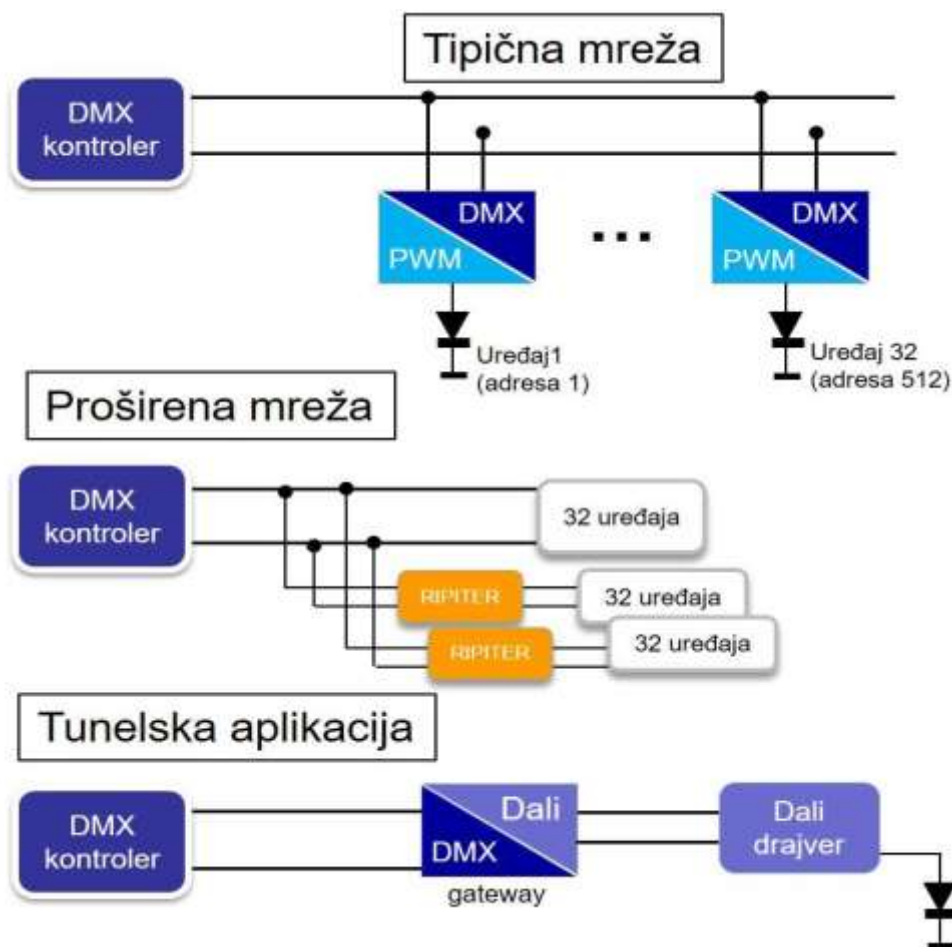
Slika 36. Šematski detalj DALI ožičavanja [23]

DALI je dvožična magistrala. Može se postaviti zajedno sa dalekovodima. U povezivanju uređaja ne zahtijeva da se pridržavamo polariteta. Pri prenosu podataka kroz liniju dolazi do pada napona koji ne bi trebao preći 2V. Maksimalna dužina kabla je 300 m.

Na digitalnu magistralu DALI značajno ne utiče šum jer ima veliku amplitudu korisnog signala. U strujno kolo se ne uključuje dodatni rele koji kontrolira da li je svjetiljka uključena ili ne. Ova činjenica smanjuje cijenu koštanja sistema.

Preko softvera upravljamo osvjetljajem svjetiljke, zadajemo njeno uključanje ili isključenje iz sistema. DALI daje povratni status svjetiljke. Svaki balast ima svoju adresu.

DMX protokol (Digital Multiplex) – DMX je standard koji opisuje kako se digitalno prenose podaci između opreme i kontrolera, kao i prateće opreme koja je dio sistema (slika 37). DMX se bavi opsom komunikacije na mehaničkom i komunikacijskom nivou između kontrolera i uređaja. On omogućava da se radi sa različitim kontrolnim uređajima od svih proizvođača. Osnova mu je industrijski standardni interfejs RS-485. Za prenos podataka koriste se dvije žice sa petopinskim konektorom. Većina opreme ima tropinski konektor. Ovo služi da se ne bi pobrkali signali koji se prenose i time uzrokovala razna oštećenja u opremi. Za povezivanja ova dva kraja koristimo adaptore.



Slika 37. DMX komunikacija u tunelskom osvjetljenju [17]

DMX standard može istovremeno kontrolisati 512 kanala jednom komunikacionom linijom. Treba napomenuti da jedan uređaj ponekad može zauzimati nekoliko kanala. Jedan kanal služi za prenos jednog parametra uređaja (ugao okretanja ogledala, orijentacija svjetlosnog snopa, boja snopa i slično).

DMX standard je široko rasprostranjen u sistemima osvjetljenja. Jednostavan je i pruža raznovrsnost u upotrebi. Međutim, uspješno je korišćen sa malim brojem uređaja. Sa povećanjem ovog broja sistem je narastao, postao ogroman gabaritno. Nezgodan je po svojoj konstrukciji, nije lak za upravljanje. Kvarove je teško otkloniti jer su elementi sistema slabo dostupni fizički. Sistem je takođe ograničen udaljenošću svetiljke od kontrolera koja ne prelazi 300m.

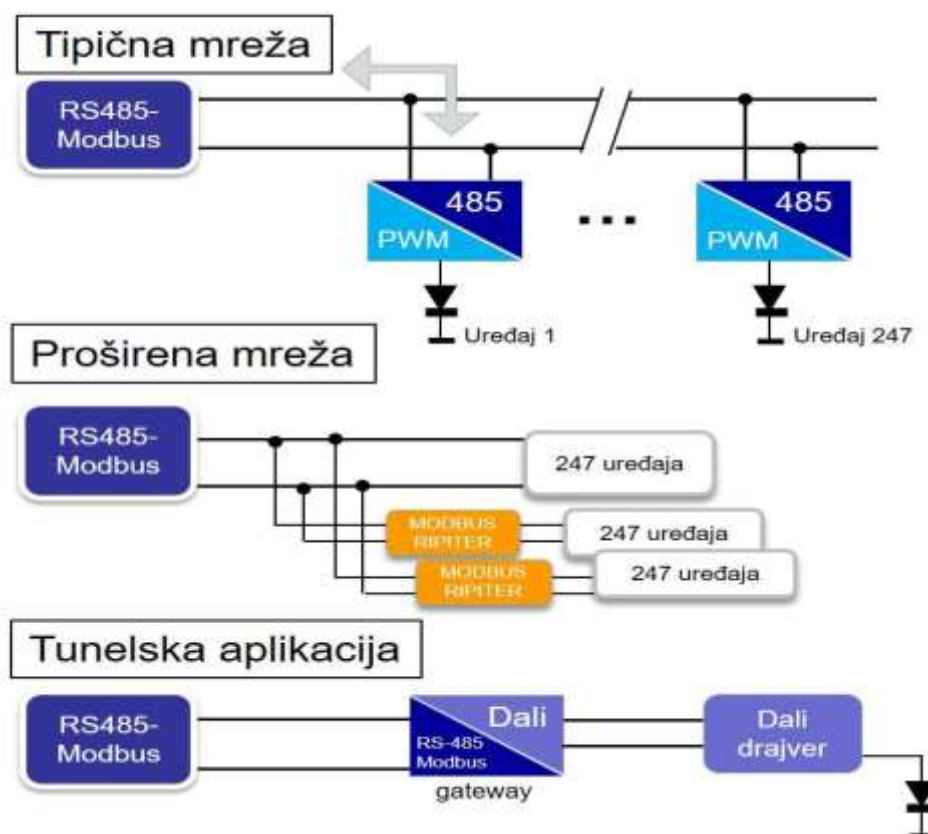
Iz ovih razloga DMX sistem nije našao primjenu u tunelskoj kontroli.

BUS protokol sa RS-485 serijskom komunikacijom

RS-485 je standard koji koristi samo jedan međusobno prepleteni par žica za prenos i prijem podataka. Ponekad se parica oplete štitom radi mehaničkih i elektromagnetnih smetnji. Prenos podataka je diferencijalni signal. Razlika u nivou napona kod provodnika istog polariteta označava jedinicu. Ako su polariteti različiti imamo logičku nulu. Standard predviđa samo električne i vremenske osobine interfejsa. RS-485 podržava do 32 elementa u jednom segmentu. Maksimalna dužina čitavog

segmenta iznosi 1200 metara. Aktivan u sistemu trenutno može biti samo jedan prijemnik. Maksimalan broj čvorova u mreži je 247. Zbog dužine linije u kablju se javlja efekat „dugih linija“. Signal koji je od jednog čvora poslat u liniju se izobličuje usled kapacitivnih i induktivnih svojstava kabla. Na kraju kabla, prema prijemniku, postavlja se otpornik (terminator) čiji je otpor jednak talasnom otporu kabla.

Ako je projektnim zadatkom predviđena automatizacija sistema tunelske rasvjete, sa komercijalnog aspekta, koristićemo BUS protokol koji je baziran na RS-485 komunikaciji (slika38).



Slika 38. MODBUS serijska komunikacija u tunelskom osvjetljenju [17]

RS-485 se bavi samo određenim skupom pravila. Ona definišu karakteristike i stanje predajnika ili prijemnika (uključen, isključen,...). Svi ostali podaci nijesu dostupni.

Ako želimo da imamo informacije o tačnoj adresi potrošača, temperaturi, gdje je nastao kvar, nivoje napona, struje, snage i slično (to su tkz. „pametni podaci“), moramo se koristiti komunikacionim protokolima. **MODBUS protokol** objedinjuje krajnje potrošače, senzore, PLC-ove, računare.

Nedostatak distributivne mreže je, između ostalog, i u tome što se ona koristi kao zajednička magistrala za sve njene činioce.

U tabeli 10 su date osobine nekih od često korištenih sistema komunikacijskih mreža koje služe za povezivanje uređaja i za komunikaciju.

PROTOKOL	BRZINA	JEDNOSMIJERNA / DVOSMIJERNA KOMUNIKACIJA	IMUNOST NA NIVO ŠUMA	BROJ ADRESA	MAKSIMALNA DUŽINA (UDALJENOST OPREME OD KONTROLERA)	PODESNOST PROTOKOLA ZA TUNELSKU PRIMJENU
DMX						
Dali						
RS485 sa MODBUS-om						
Powerline						

Tabela 10. Sistemi komunikacije i njihove uporedne karakteristike [18]

Dalje, u tabeli 11 je dat brojčani pregled za pobrojane sisteme komunikacije, u zavisnosti od brzine protoka, broju adresa, maksimalnog rastojanja za povezivanje opreme i odnosa prema šumovima.

Karakteristike	DMX	Dali	RS485 sa MODBUS-om	Powerline
Brzina	250 Kb/s	1.2 Kb/s	2.4 - 9.36 Kb/s	2-200 Mb/s
Broj adresa	512	64	247	256
Max. udaljenost opreme	500	300	1200	400
Imunost na nivo šuma	veoma dobra	slaba	odlična	veoma slaba

Tabela 11. Brojčane vrijednosti za tipove komunikacije [18]

Što se tiče karakteristika ovih komunikacija može se izvesti zaključak da komunikacija RS-485 sa MODBUS-om ima veliki broj adresa, pokriva dovoljno velike dužine u električnim vodovima i ima najveću otpornost na šumove. Prenos podataka je blagovremen, komanda tačna. Zato je RS485 sa MODBUS-om najbolji sistem komunikacije za kontrolu tunelske rasvjete.

3.5 Sistem daljinskog upravljanja i nadzora

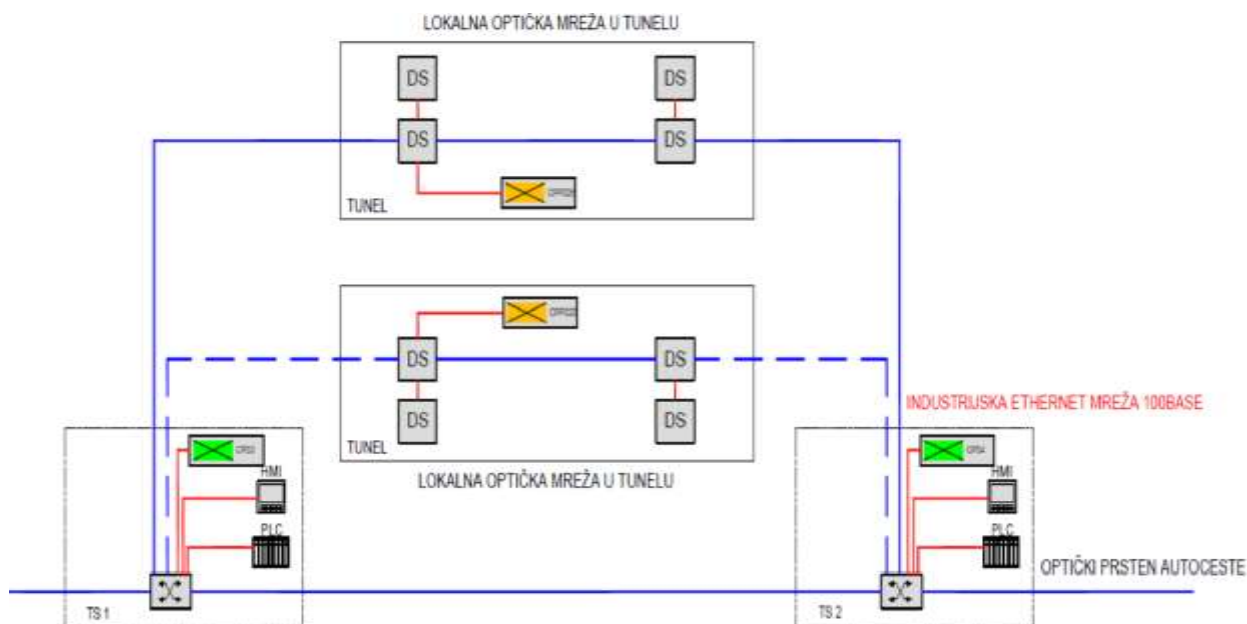
Ako pristupimo objedinjavanju svih sistema koje prate jedan autoput u jednu novu, zajedničku platformu, dobićemo objedinjeni sistem daljinskog upravljanja i nadzora. Funkcija ovoga sistema je da vrši nadzor i upravlja instalisanim sistemima sa jednog mjesta.

Prije nego što se uradi kompletna studija i izvede sam kontrolni centar, svi sistemi u tunelu, kao jednom segmentu autoputa, objedinjuju se u jednu cjelinu (slika39), tj. jedan podsistem.

Podsistem sadrži instalisane "daljinske" stanice koje upravljaju pojedinačnim segmentima, kao što su:

- Sistem tunelske rasvjete,
- Ventilacija i klimatizacija,
- Nadzor nad sistemima napajanja tunela (trafo stanice, UPS i dizel električni agregat,
- Prometno informacijski sistem,
- Video sistem,
- Pojava požara i odimljavanje tunela,
- Upravljanje i nadzor nad nišama u tunelu i pješačkim prolazima,

- Audio sistem,
- Alarmni sistem.



Slika 39. Šema sistema daljinskog upravljanja u tunelu [26]

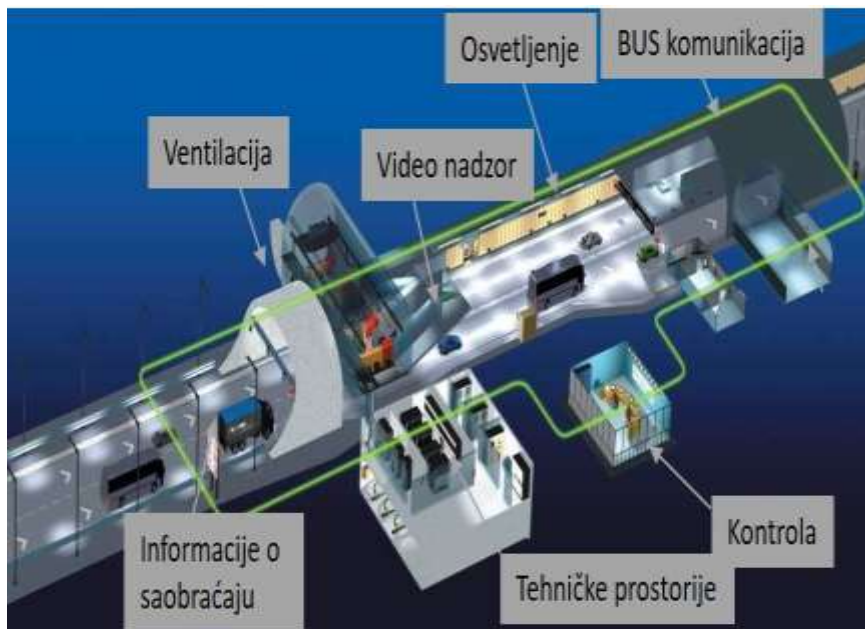
Pored tunela, kao jednog segmenta autoputa, potrebno je i sve prateće sadržaje i objekte objediniti u jednu zajedničku platformu (slika 40). Iz tako formiranog centra vrši se nadgledanje i kontrola protoka saobraćaja.



Slika 40. Centar za održavanje i kontrolu protoka saobraćaja (COKP) [26]

3.6 SCADA sistem daljinskog upravljanja i nadzora

Komunikacijska mreža je povezala sve podsisteme vezane za opremu koja je sadržana u tunelu i oko tunela sa centralnim sistemom iz kojeg se vrši nadzor i upravljanje (slika 41). Za objedinjavanje i centralizaciju svih podsistema možemo koristiti sistem SCADA.



Slika 41. Objedinjavanje svih podsistema u tunelima [14]

SCADA (Supervisi Control And Data Acquisition) označava nadzornu kontrolu i prikupljanje podataka. To je softverski paket koji obezbeđuje rad sistema u realnom vremenu. Prvo prikuplja podatke, obrađuje ih, prikazuje na računaru, Arhivira sve podatke i scenarija o objektu koji nadzoriše i kojim upravlja. Često je SCADA sistem dio neke druge cjeline kao što je neki naučni eksperiment, automatizacija nekog objekta i slično. Može biti i sastavni dio nekog šireg procesa kao što je APC (automated process control system) automatski sistem upravljanja procesom, ASKUE (automatski sistem za daljinsko očitavanje brojila). SCADA sistemi imaju veoma široku primjenu. U privredi se primjenjuju svuda gdje se ima potreba da operator upravlja tehnološkim procesima u realnom vremenu. Na nekom od programskih jezika ispisuje se programski kod za SCAD-u. Sam softver se instalira na računaru.

SCADA sistem ima ispred sebe set zadataka koje rješava:

- prikuplja podatke u realnom vremenu tako što komunicira sa uređajima za komunikaciju preko drajvera,

- obrađuje podatke u realnom vremenu,

- daje prikaz informacije na računru u vidu neke forme koja je pogodna za operatera,

- formira i održava bazu podataka, čuva sva scenarija bilo kojeg procesa kojim upravlja,

- upravlja alarmnim stanjima i daje signal na računaru,

-arhivira greške u procesima i priprema podatke o napredovanju tehnološkog procesa.

SCADA sistemi su veoma pouzdani sistemi i omogućavaju sigurnost u upravljanju. Instalirani softverski paket kontroliše ispravnost komandi daljinskog upravljanja, greška operatera smanjena je na minimum.

Shodno rečenom SCADA sistem u sebi sadrži sledeće podsisteme:

- I/O dražveri ili serveri - komunikacija sa kontrolerima, uređajima za unos informacija, uređajima koji daju informaciju, brojlama i slično,
- Sistem u realnom vremenu – obezbeđuje obradu podataka po prioritetu,
- Program uređivač – za razvoj interfejsa,
- HMI (Human Machine Interface) – alat koji predstavlja podatke operateru. Ovaj dalje kontroliše i upravlja tehnološkim procesom.
- Logički upravljački sistem – obezbeđuje izvršavanje korisničkih programa i čuva svaki scenario ,
- Sistem za upravljanje alarmom,
- Report Generator – kreira izvještaje o procesnim događajima.

Većina kontrolnih radnji se obavlja automatski, kako bi se greška smanjila na najmanju moguću mjeru. Samu kontrolnu radnju zadaje PLC a SCADA upravlja načinima rada. SCADA sistem pruža mogućnost operateru da izmjeni neku zadatu vrijednost vezanu za odvijanje procesa.

SCADA sistem može da radi autonomno. Primjenjujući ovaj način sistem se sastoji od više radnih stanica koje se međusobno ne poznaju. Sve funkcije sistema se obavljaju na nekoliko nezavisnih stanica.

SCADA može da se formira u arhitekturu „klijent server“. Kod ove organizacije sistem radi na serveru. Proces je praćen od strane operatora iz klijentskih stanica. Kod visoko pouzdanih sistema server se gradi tako što mu se dodjeljuje više nivoa kritičnih funkcija. Dupliraju se klijentske stanice. Ovakav sistem može da razdvoji funkcije koje ima SCADA između servera. Arhiviranje se vrši na jednom serveru, upravlja se alarmom sa drugog servera i slično.

Vrlo je važno napomenuti činjenicu da su SCADA sistemi podložni neovlašćenom stranom upadu (hakerski napad). Vrlo je važno u procesima velikog rizika poštovati tajnost i zaštitu podataka, sačuvati bezbjednost informacije.

3.7 Primjer tunelskog kontrolnog sistema

Kompanija Schreder, osnovana u Belgiji , predstavlja grupaciju koja se danas, između ostalog, bavi i teži da ona bude njena osnovna djelatnost – opremom za spoljno uređenje.

Schreder je na vrijeme uočio značaj projektovanja i razrade opreme i tehnike vezane za uličnao i tunelsko osvetljenje. **Kompanija Phoenix Contact**, osnovana u Njemačkoj je lider na tržištu za napojne uređaje, priključne blokove, konvertore podataka, zaštitu od prenapona i slično .Bave se i industrijskim računarima, softverom i industrijskim Ethernet-om.

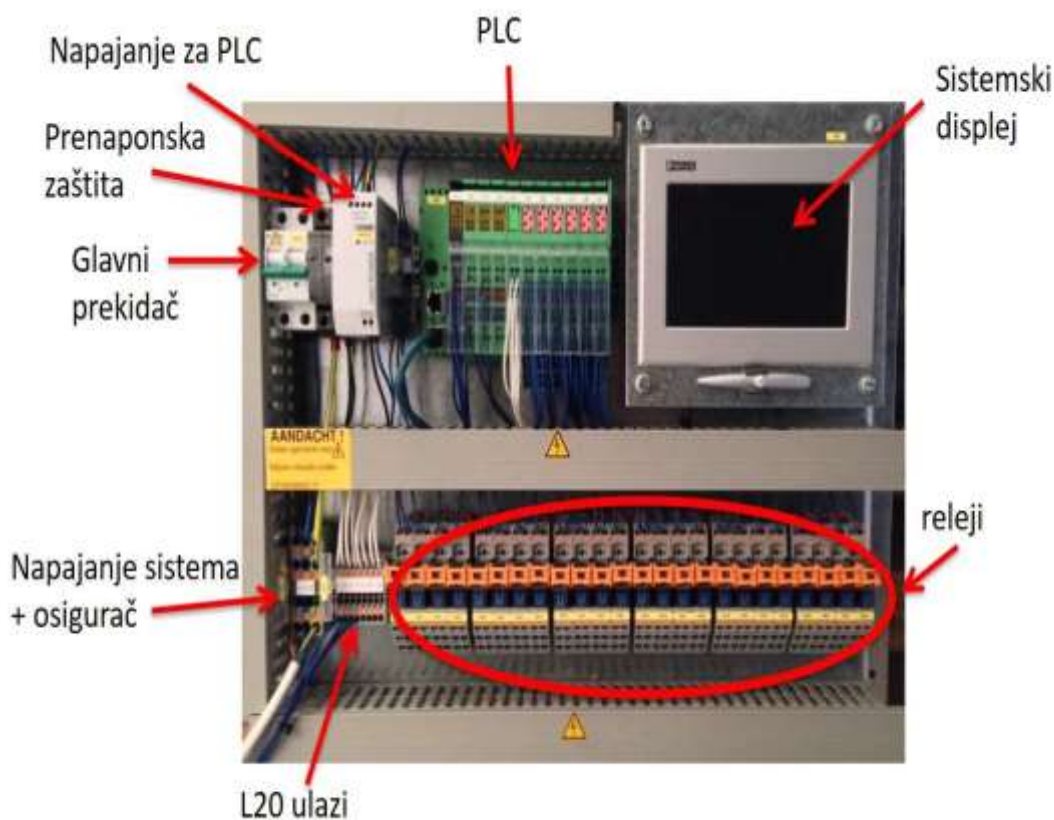
U zajedničkoj saradnji napravili su dva sistema za tunelsku kontrolu rasvjete, koja su često primjenjivana u Evropi i našem okruženju .

-jedan sa osnovnom kontrolom (BTS) i

-tri sa naprednom kontrolom (ATS).

3.7.1 Sistem sa osnovnom kontrolom upravljanja

Sistem BTS (Basic Tunnel Solution) sa osnovnom kontrolom radi se samo po porebi ili odvojenom zahtjevu. Predstavlja osnovni sistem za upravljanje rasvjetom u tunelu (slika 42).



Slika 42. Sistem sa osnovnom kontrolom upravljanja instalacijom osvjjetljenja [28]

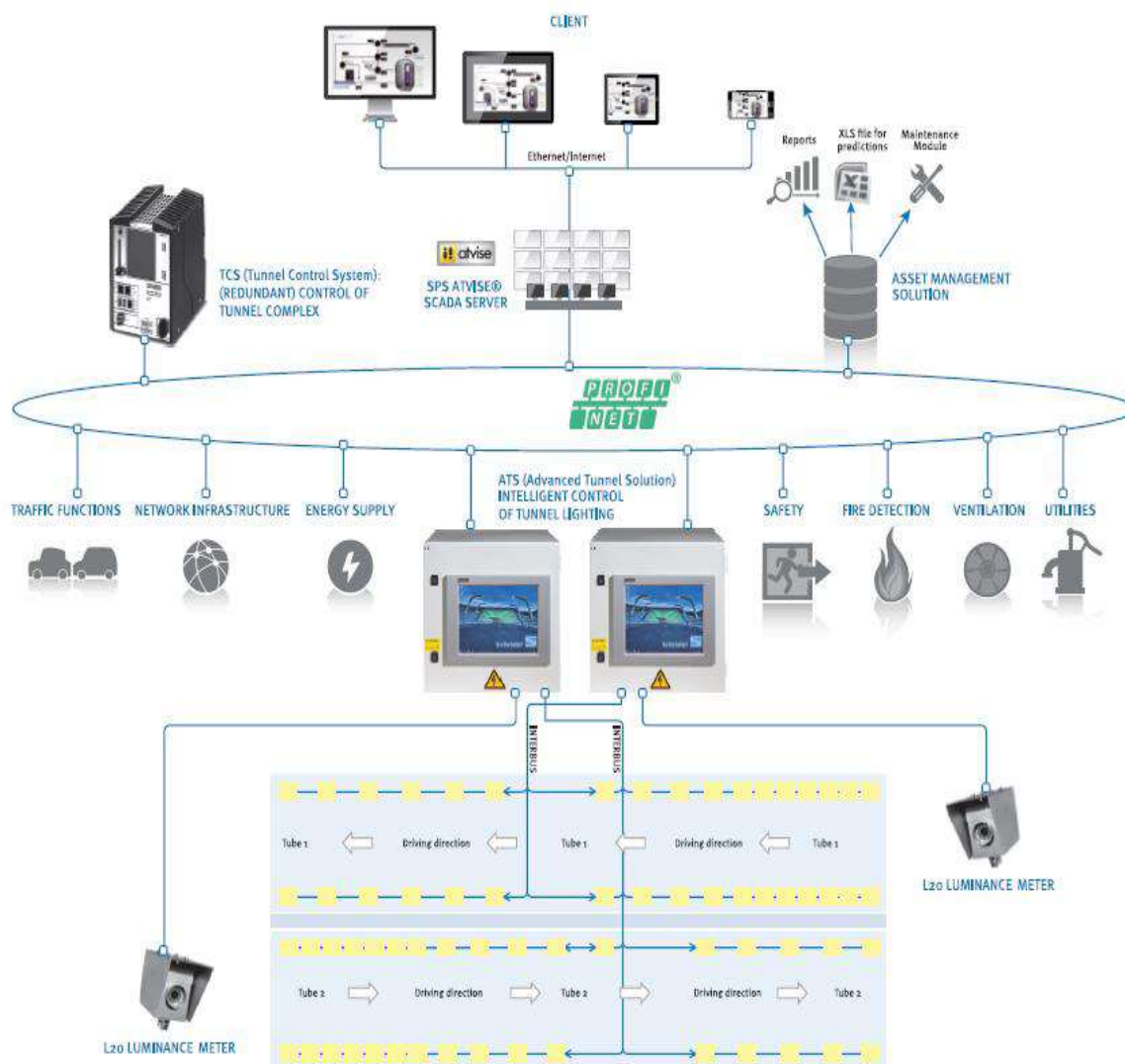
Sistem rada ovoga sistema je opisan slikom 35. Kao što vidimo sistem je kompaktan i sadrži ormar u kojem je smještena oprema:

- PLC sa sistemskim displejom,
- Zaštitna oprema (prenaponska zaštita, glavni prekidač, osigurači),
- Četiri ulaza za kameru L20 , 24 izlaza za upravljanje strujnim krugovima.

Podešavanje samih parametara sistema vrši se preko PLC-a. Sistem se može integrisati u neki SCADA sistem koristeći neki od protokola.

3.7.2 Napredni sistem upravljanja

Sistem ATS - Advanced Tunnel Solution, grafički je prikazan na slici 43. To je napredni sistem upravljanja kojem odgovara sistem tunelske kontrole koji je opisan slikom 37.



Slika 43. Napredni ATS sistem upravljanja instalacijom osvetljenja [27]

ATS sistem se isporučuje kao kompaktna cjelina. Kompletira se radionički. "Touch-screen" ekran omogućava podešavanje sistema i lokalnu kontrolu.

ATS napredni sistem obavlja funkcije:

- Dimuje svaku svetiljku ponaosob, ili grupu svetiljki. Obavlja funkciju uključenja ili isključenja,
- Svakoj svetiljci u sistemu se dodjeljuje lična adresa. Ona služi kod upravljanja funkcijama svetiljke, otklanjanja kvarova,
- U svakom trenutku imamo stanje nivoa napona, jačine struje, samim tim imamo podatak o potrošnji energije,
- Obavlja regulaciju rada svetiljke prema gustini saobraćaja i brzini kretanja vozila.

4. Studija slučaja

4.1. Tunel Budoš

Daćemo uvid u primjenu LED tehnologije u sklopu realizacije projekata rasvjete tunela Budoš na magistralnom putu Niksić – Podgorica (Slika 44).

Prva LED realizacija u Crnoj Gori Tunel Budoš



Slika 44. Osvjetljenje tunela Budoš na magistralnom putu Niksić – Podgorica [24]

Glavni projekat rekonstrukcije instalacije osvjjetljenja tunela "Budoš" urađen je zbog izmjene dotrajale postojeće instalacije osvjjetljenja koja je vremenom izgubila svoju pravu funkciju i njeno investiciono održavanje u daljem periodu nije imalo smisla. Urađeno je potpuno novo projektno rješenje osvjjetljenja tunela, sa tim što je, radi manjeg investicionog ulaganja, zadržana instalacija napojnih vodova razvodnih ormana kao i pozicije glavnih razvodnih ormana. Zadržani su i izvori napajanja (TS 10/0,4 kV).

Postojeće osnovno napajanje instalacija osvjjetljenja tunela "Budoš" se vrši sa napojnih trafostanica TS 10/0,4 kV "1", postavljene sa sjeverne strane tunela, i TS 10/0,4 kV "2" postavljena sa južne strane tunela. Ove dvije trafostanice su povezane kablovskim 10 kV vodom PP41 3x25 6/10 kV.

Iz TS "1" izlaze dva napojna NN voda izvedena kablom PP 00 4x50 0,6/1 kV koja dalje napajaju razvodne baterije RB1 i RB2.

Iz TS "2" izlazi jedan napojni NN vod izveden kablom PP 00 4x50 0,6/1 kV koji dalje napaja razvodne baterije RB3 i RB2.

Nedostatak igra činjenica da je mrežno napajanje TS izvedeno samo iz jednog distributivnog pravca. Projektom je predviđena, ali nije izvedena (treba regulisati sa elektro distribucijom) ugradnja UPS-ova u TS.

U prtethodnoj instalaciji osvjetljenja tunela bile su postavljene:

- Svetiljke FR4B sa dvije natrijumove sijalice niskog pritiska snage 180 W (SOX – 2x180 W)
- Proizvodnje "Schreder" Belgija – 80 kom
- Svetiljke FR4B sa dvije natrijumove sijalice niskog pritiska snage 90 W (SOX – 2x 90 W)
- Proizvodnje "Schreder" Belgija – 80 kom
- Svetiljke FR4B sa dvije natrijumove sijalice niskog pritiska snage 55 W (SOX – 2x 55 W)
- Proizvodnje "Schreder" Belgija – 64 kom
- Svetiljke FR3B sa dvije natrijumove sijalice niskog pritiska snage 55 W (SOX – 2x 55 W)
- Proizvodnje "Schreder" Belgija – 76 kom

Njihova ukupna instalisana snaga iznosi:

$$P_{in} = 80 \times (2 \times (180 + 40)) + 80 \times (2 \times (90 + 35)) + 140 \times (2 \times (55 + 21)) = 76\,480 \text{ W}$$

Kada na ovo dodamo instalisanu snagu dionica puta:

- Svetiljka GSOB sa natrijumovom sijalicom niskog pritiska, snage 180 W (SOX – 1x180 W)

$$P_{in} = 2 \times (5 \times (180 + 40)) = 2\,200 \text{ W},$$

Dobija se ukupna instalisana snaga osvjetljenja tunela

$$P_{in} = 78\,800 \text{ W [6].}$$

Ukupna instalisana snaga, po novom projektu, iznosi $P_{in} = 56\,981 \text{ W}$, što znaci da osnovni napojni vodovi, kao i napojne TS zadovoljavaju uslove nove instalacije.

Postojeća instalacija osvjetljenja bila je predviđena za rad u tri dnevna režima, koji zavise od vanjske (dnevne) osvjetljenosti, i jedan noćni režim.

Dnevni režimi radani su dati kao:

- 100 %-ni režim rada,
- 50 %-ni režim rada,
- 17 %-ni režim rada.

Oni se uključuju komandom pripadajucih fotorelea (po tri sa obadvije strane tunela) pri:

- 17 %-ni - spoljnoj osvjetljenosti iznad 2 000 lx,
- 50 %-ni - spoljnoj osvjetljenosti iznad 7 000 lx,
- 100 %-ni - spoljnoj osvjetljenosti iznad 24 000 lx.

Posebni fotorelei uključuju osvjetljenje prilaznih dionica puta čim dnevna svjetlost padne na 10 lx.

Osvjetljenje prilaznih dionica puta ostvareno je sa svjetilkama tipa "Schreder" GEOB sa natrijumovom sijalicom niskog pritiska 180 W (SOX - 180 W) uz visinu vješanja 11 m, sa lučnim nosačem svjetiljke. Rastojanje među stubovima je 40 m, a ugrađeno je po pet stubova sa obadvije strane.

Takvim osvjetljajem se dobija (fotometrijski proračun) osvjetljenje od $E_{sr} = 29,9 \text{ lx}$. Napojni vodovi za ove instalacije (od baterija RB1, RB3) su urađeni kablovima PP 41 4x2,5 0,6/1 kV.

Napajanje rasvjete u tunelu izvedeno je kablovima PP 00 2x2,5 0,6/1 kV. Prema projektu za povezivanje fotorelea i foto sonde predviđeni su kablovi PP 00 2x2,5 0,6/1 kV.

4.2 Novo projektno resenje tunela "Budos"

Zadržano je osnovno napajanje instalacija osvjjetljenja:

- Kablovski 10 kV vod TS 10/0,4 kV – "1" - TS 10/0,4 kV – "2" izveden kablom PP 41 3x25, 6/10 kV;
- Kablovski 1 kV vod TS 10/0,4 kV – "1" - RB1 (po ovom projektu RO-3) – RB2 (RO-2) izveden kablom PP 00 4x50, 0,6/10 kV;
- Kablovski 1 kV vod TS 10/0,4 kV – "1" - RB2 (RO-2) – RB2 (RO-2) izveden kablom PP 00 4x50, 0,6/10 kV;
- Kablovski 1 kV vod TS 10/0,4 kV – "2" - RB3 (RO-1) – RB2 (RO-2) izveden kablom PP 00 4x50, 0,6/10 kV.

4.3 Osvjetljenje prilaznih dionica puta tunela "Budoš"

Prilazne dionice puta tunela se osvjjetljavaju u dužini od 170 m, a to iznosi više od dvije dužine puta koji je vozaču neophodan da bi izvršio zaustavljanje.

Usvojene su svjetiljke " AMPERA MIDI 64 LEDS 700 mA NW Glass extra Clear Flat Smooth 5136 (matrica 336072)" instalisane snage 130 W. Svetiljka je na stubu visine 10 m, bez lučnog nosača, pod nagibom 10°. Vozač se, ovim izborom svjetiljki, prilagođava na tunnelsko osvjjetljenje.

Fotometrijski proračun je rađen pri položaju optickog centra svjetiljki 0,5 m od krajeva kolovozne trake (sama osa stuba 1m).

Raspon između stubova je 32 m. Prvo stubno mjesto je na 25 m od portala tunela, ali se mora voditi računa prilikom približavanju ulaznom portalu tunela o objektima koji se tu nalaze. Nivo sjajnosti kolovoza na tom dijelu dionice puta iznosi $L_{sr} = 2,03 \text{ cd/m}^2$ i dosta je visoke vrijednosti. On je ipak manji od sjajnosti kolovoza pri baznom osvjjetljenju, što je i preporuka, i omogućava manje izmjene u rasponima između stubnih mjesta.

Osvjetljenje prilaznih zona tunelu je u funkciji osvjjetljenja tunela. Instalacija se izvodi polaganjem kabla PP 00 4x16 0,6/1 Kv i priključuje se u razvodnim ormanima "RO-1" i "RO-3". Ovi kablovi se polažu zajedno sa ostalim napojnim vodovima trasom kablovskih kanala u tunelu, a van tunela se polažu u zemljanom rovu.

4.4 Osvjetljenje unutrašnjosti tunela "Budos"

4.4.1 Kategorizacija tunela

Tunel "Budoš" spada u duge tunele (prema CIE).

4.4.2 Podjela tunela na zone osvjetljenja

Noćno osvjetljenje je slično osvjetljenju dionica puta koje tunel povezuje (osvjetljenju prilazne zone). Vrijednost sjajnosti kolovoza tunela treba da bude nešto veća od sjajnosti kolovoza prilaznih saobraćajnica.

Dnevno osvjetljenje tunela zahtijeva neutralisanje više negativnih pojava. One se javljaju kod vozača u toku vožnje pri ulasku u neosvjetljeni ili loše osvjetljeni tunel (adaptacija, suženje vidnog polja, pojava fenomena "crne rupe").

Različiti vidni zahtjevi uzrokuju različite karakteristične zone:

- Prilazna zona – dio saobraćajnice ispred ulaza u tunel i njegova dužina je jednaka puta potrebnom da se vozilo zaustavi;
- **Zona praga** – ulazni dio tunela čija dužina ne smije biti manja od dionice koju vozilo pređe prilikom zaustavljanja;
- **Tranzitna zona (prelazna zona)** – nastavak zone praga u kojoj se vrijednost inteziteta sjajnosti postepeno smanjuje, bez narušavanja vidnih uslova;
- **Unutrašnja zona** – dio tunela u kojem se već postigla potpuna adaptacija vida vozača prolazeći kroz tunel na najmanji nivo sjajnosti u tunelu. Taj nivo sjajnosti je u njenoj čitavoj dužini konstantan;
- **Izlazna zona** – ne razmatra se u ovom slučaju (ovdje se odvija dvosmjerni saobraćaj).

Osvjetljenje dionice puta kroz tunel u dnevnim usloviima definisano je različitim stepenima sjajnosti svake zone ponaosob. Proračun sjajnosti nivoa prilazne zone se određuje prema intezitetu dnevne svjetlosti. Za ostale zone tunela za proračun je referentna vještačka svjetlost.

4.4.3 Određivanje zaustavnog puta vozila

Izračunaćemo dužinu puta koja je potrebna da se vozilo zaustavi krećući se dozvoljenom brzinom, od momenta uočavanja neke eventualne prepreke do potpunog zaustavljanja.

Dozvoljena brzina vozila je 60 km/h, nagib kolovoza je 0%. Račun je uzet po standardu DIN 67542 i iznosi nešto manje od 60 m.

4.4.4 Određivanje veličine nivoa sjajnosti prilazne zone

Sjajnost prilazne zone, koju označavamo sa L_{20} , se racuna po formuli

$$L_{20} = \gamma L_C + \rho L_R + \varepsilon L_E + \tau L_{th} \quad (4)$$

gdje su:

L_C = sjajnost neba;

L_R = sjajnost puta;

L_E = sjajnost okruženja,

a parametri:

γ - procenat učešća neba,

ρ – procenat učešća puta,

ε - procenat učešća okruženja,

τ – procenat učešća ulaza.

L_{th} = sjajnost u momentu vozačevog prolaska kroz ulazni portal tunela

Ovdje važi relacija $\gamma + \rho + \varepsilon + \tau = 100\%$.

Vrijednost parametara ponaosob se određuje sa napravljenih fotografija. Izrađujemo fotografiju oba ulaza u tunel i sanjih uzimamo vrijednosti ovih parametara. Objektiv fotoaparata u stvari simulira položaj i ulogu vozačevog vida kada se ovaj nalazi na udaljenosti od ulaznog portala tunela koja je jednaka veličini zaustavnog puta vozila.

Sam proračun za sjajnost L_{20} je izvršen u projektnom birou firme "Minel – Schreder" korišćenjem fotografija i tabele sadržane u preporukama CIE[6].

Dobijene su vrijednosti za:

- Sjeverni prilaz: $L_{20} = 3.657 \text{ cd/m}^2$
- Južni prilaz: $L_{20} = 3.396 \text{ cd/m}^2$

4.4.5 Određivanje veličine L_{th} - nivoa sjajnosti zone praga

Prilikom ulaska u tunel počinje zona praga. U njoj je veličina sjajnosti linearno proporcionalna vrijednosti sjajnosti ulazne zone. Njena vrijednost je definisana njihovim odnosom (relacija 5).

$$k = L_{th}/L_{20} \quad (5),$$

gdje su:

L_{th} = sjajnost na ulazu u tunel,

L_{20} = sjajnost prilazne zone.

Veličina L_{th} ili je konstantna duž čitave zone praga ili se vrši dalja korekcija te vrijednosti. Tek kada pređemo polovinu zone praga vrši se korekcija nivoa sjajnosti.

Ovdje se vrijednost L_{th} koriguje do 40 % sjajnosti u prvom dijelu, što je i primjenjeno ovdje radi racionalnijeg rešenja osvjetljenja.

U našem slučaju $k = 0,05$, pa dobijamo

$$L_{th} = 182,85 \text{ cd/m}^2 - \text{ sjeverni ulaz,}$$

$$L_{th} = 169,80 \text{ cd/m}^2 - \text{ južni ulaz.}$$

Usvojeni raspored baznih svjetiljki i adaptacionih svjetiljki obezbjeđuje nivo zone praga od $189,8 \text{ cd/m}^2$, a ona se na kraju zone praga smanjuje na 40 % navedene vrijednosti (zbog racionalizacije).

4.4.6 L_{th} – izračunavanje nivoa sjajnosti prelazne zone.

Prelazna zona se nalazi između kraja zone praga do početka unutrašnje zone. Tako opada i vrijednost samog L_{th}, sa jednog nivoa, na drugi nivo.

Određuje se iz formule

$$L_{tr} = L_{th} (1,9 + t)^{-1,4} \quad (6)$$

Ovdje je

L_{tr} – sjajnost minimalne dozvoljene vrijednosti za trenutak t, računajući t kao nulu pri ulasku u prelaznu zonu.

Redukcija sjajnosti u prelaznoj zoni se u praksi odvija skokovito. Ta redukcija sjajnosti ne ide preko 1/3 pri svakom koraku. Tako dobijena stepenasta kriva je nešto iznad idealne teorijske krive (CIE kriva) koju određuje relacija 6.

4.4.7 L_{in} – određivanje nivoa sjajnosti unutrašnje zone

Čitavom dužinom ove dionice puta kroz tunel osvjetljenost tunela svedena je na najmanju vrijednost, završena je potpuno adaptacija čovječijeg vida na promjenu sjajnosti. Ovu vrijednost određuju brzina vožnje i gustina saobraćaja kroz tunel. Naš zadatak za tunel "Budoš" bio je da se postigne vrijednost sjajnosti u unutrašnjoj zoni od 3 cd/m^2 , u skladu sa preporukama CIE.

4.4.8 Određivanje nivoa sigurnosnog osvjetljenja

Minimalna osvjetljenost tunela, cijelom njegovom dužinom, pri radu sigurnosnog osvjetljenja iznosi 10 lx. Sigurnosno osvjetljenje se obezbjeđuje korišćenjem svjetiljki baznog osvjetljenja. Bazne svjetiljke su u stvari i čitavo noćno osvjetljenje. Postiže se osvjetljenje kolovoza od 3 cd/m^2 , s tim što će fluks tih svjetiljki smanjenjem snage biti smanjen za 50 %. Tada se dobija sjajnost kolovoza od $1,5 \text{ cd/m}^2$, a tome odgovara srednja osvjetljenost kolovoza od oko 20 lx.

4.5 Svjetiljke koje su instalisane u unutrašnjosti tunela "BUDOŠ" [7]

Kao **bazne svjetiljke** usvojene su svjetiljke:

GL2 C/5102/80LEDs@500 mA/Symetric (51 kom) instalisane snage 127W,

sa relejem za smanjenje snage (za 40%) i svjetlosnog fluksa (za 50 %), da bi se koristila i za sigurnosno osvjetljenje tunela (pri ispadu distributivnog napajanja).

Za adaptaciono osvjetljenje usvojene su svjetiljke:

GL2 C/5102/96LEDs@700 mA/Symetric (206 kom) instalisane snage 226W,
GL2 C/5102/80LEDs@700 mA/Symetric (12 kom) instalisane snage 190W.

Kućište svjetiljke je napravljeno od Al, optički blok je hermetički zatvoren i nema održavanja tokom životnog vijeka (osim pranja dva puta godišnje). Izvedba u IP66 omogućava pranje vodom pod pritiskom, a svjetiljka je otporna na udare (po konstrukciji). Otporna je na koroziju i vibracije.

Optički blok sadrži 16, 32, 48, 64, 80, 96 dioda hladno bijele boje (ovdje radimo sa svjetilkama 80 i 96 dioda) i višeslojna Al ogledala koja usmjeravaju svjetlosni fluks. Bijela boja pruža znatno bolju vidljivost od tradicionalnih izvora svjetlosti, a postiže se i bolja ravnomjernost sjajnosti na površini kolovozne trake i zidovima tunela.

Svjetlosni fluks, koji postiže odabrana **svetiljka GL2 C/5102/80LEDs@500 mA/Symetric** (pri punoj snazi) iznosi 15 100 lm. Pri sigurnosnom osvjetljenju fluks svjetiljke se smanjuje za 50 %.

Svetiljka GL2 C/5102/96LEDs@700 mA/Symetric daje svjetlosni fluks 23 300 lm, a

Svetiljka GL2 C/5102/80LEDs@700 mA/Symetric daje svjetlosni fluks 19 400 lm.

4.6 Režimi rada instalacije osvjetljenja u tunelu

Kompletna instalacija osvjetljenja (uključenje i isključenje pojedinih svjetiljki) ima više režima rada:

- Režim 100 % rada** - rade sve bazne svjetiljke (puna snaga i fluks) i sve adaptacione svjetiljke;
- Režim 75 % rada** - sve bazne svjetiljke (puna snaga i fluks) i 162 adaptacione svjetiljke – 156 svjetiljki **GL2 C/5102/96LEDs@700 mA/Symetric** i 6 svjetiljki **GL2 C/5102/80LEDs@500 mA/Symetric**;
- Režim 50 % rada** - rade sve bazne svjetiljke (puna snaga i fluks) i 104 adaptacione svjetiljke **GL2 C/5102/96LEDs@700 mA/Symetric**;
- Režim 25 % rada** - rade sve bazne svjetiljke (puna snaga i fluks) i 50 adaptacionih svjetiljki **GL2 C/5102/96LEDs@700 mA/Symetric**;
- **Režim noćnog rada** - rade sve bazne svjetiljke (puna snaga i fluks) **GL2 C/5102/80LEDs@500 mA/Symetric**.

Sve adaptacione svjetiljke su isključene.

Za slučaj havarijskog napajanja (radi UPS) u funkciju se stavljaju sve bazne svjetiljke, ali sa smanjenom snagom ($122 \times 0,6 + 5 = 78,2$ W), koje odaju tada 50 % fluksa.

4.7 Upravljanje osvjetljenjem tunela

Za upravljanje osvjetljenjem tunela primjenjena je oprema "ELREM" D.O.O. Zagreb.

Sistem regulacije radi po funkciji osvjetljenosti prilazne zone tunela L_{20} , prema preporukama CIE 88/90. Regulacija je automatska i proporcionalna. Na osnovu promjene vanjskog osvjetljenja regulišu se

svi ostali parametri osvjetljenja. Promjena vrijednosti vanjskog svijetla odrediće i nivo sjajnosti duž čitavog tunela.

Sistem posjeduje svjetlosnu sondu sa signalnim izlazom, više razdjelnika tunelske rasvjete sa ugrađenim kompletom za regulaciju rasvjete ELREM PRO (u našem slučaju RO-1 i RO-3) i ostalom pripadajućom opremom (kontaktori, prekidači, ...).

Regulacijom osvjetljenja tunela može se upravljati procesorski (automatski), lokalno -ručno, i izvodi se po kompozitnom načinu (skokovito + kontinualno).

4.8 Napojni vodovi svetiljki

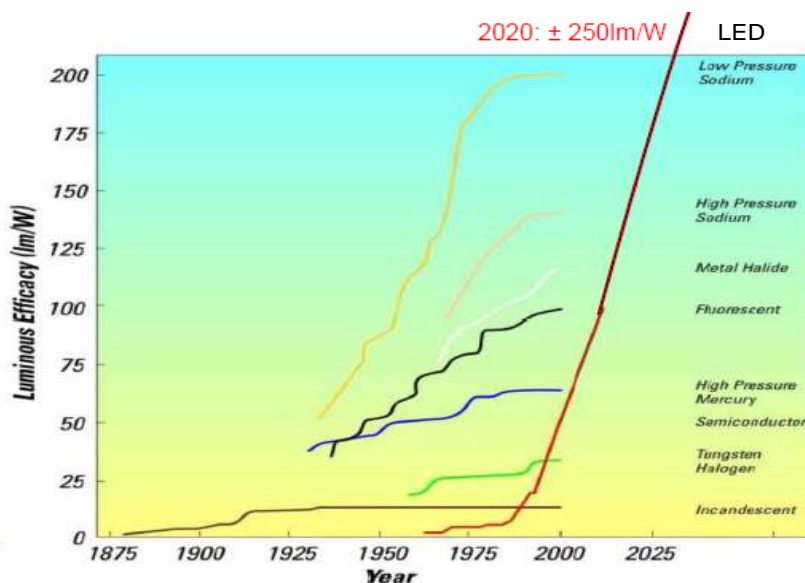
Za vezu od razvodnih ormara do svetiljki predviđeni su kablovi:

- PP 00 5x2,5 0,4/1 Kv – za osnovne napojne vodove adaptacionih svetiljki;
- PP 00 3x2,5 0,4/1 Kv - za priključenje adaptacionih svetiljki na osnovne napojne vodove;
- NHXHX FE 180/90 5x2,5 0,6/1 Kv – za osnovne napojne vodove baznih svetiljki;
- NHXHX FE 180/90 3x2,5 0,6/1 Kv – za priključenje baznih svetiljki na osnovne napojne vodove i za osnovne i priključne napojne vodove sigurnosnog osvjetljenja.

Za napajanje baznih svetiljki, u cilju obezbjeđivanja njihovog rada (one imaju i funkciju sigurnosnog osvjetljenja) predviđeni su beshalogeni vatrootporni niskonaponski vodovi (u slučaju požara obezbjeđuju rad ne manje od 180 min.).

5. ZAKLJUČAK

Pored energetske efikasnosti i ovako zahtjevnih uslova i promjene režima rada daju nesagledivu prednost primjeni LED izvora svjetlosti pri rješavanju navedenih pitanja. U današnjem trenutku cijena LED izvora svjetlosti opada, energetska iskoristivost (Slika 45) raste, a upravljivost izvora svjetla ovog tipa je mnogo jednostavnija nego kod konvencionalnih izvora svjetla.



Slika 45. Svjetlosna iskoristivost izvora svjetlosti [5]

Postoji veliki broj LED rasvjetnih tijela koji se prave prema snazi, gabaritima, načinu i uslovima primjene. Tu spadaju lampe, reflektori, trake, cijevi.

Za projektovanje i izvedbu tunelskih sistema rasvjete posebno su interesantni LED reflektori.

Široku primjenu u LED osvjetljenju imaju RGB lampe. Ako upravljamo svakom od boja ponaosob, kombinacijom nekih od ove tri boje možemo dobiti sve ostale. Ovakvo svojstvo RGB lampi nam daje mogućnost da primjenjujemo LED rasvjetu kod mnogih posebnih i specifičnih potrošača.

Kod LED svjetlosni fluks raste pri padu temperature. Maksimalni fluks se postiže na temperaturi ambijenta od -30°C . Ovakav scenario se koristi za primjenu LED kod uređaja koji rade u ovakvim uslovima.

Upotreba LED je **ekološki prihvatljiva**. Njena upotreba ne čini prijetnju po potrošače niti škodi životnoj sredini.

Zbog specifičnosti procesa stvaranja svjetla ovi izvori su gabaritno mali i mala im je ukupna težina. Ovo svojstvo daje korisniku prednost u **lakoj i pogodnoj eksploataciji**.

Kod dobro isprojektovanog sistem osvjetljenja sa pravilnom regulacijom i upravljanjem, možemo postići dodatnu uštedu u potrošnji energije, koja ide čak i do 30% u odnosu na sisteme koji su do sada postojali. Ovo je veoma bitno jer se čak 19% električne energije na nivou cijelog svijeta troši na rasvjetu.

Intenzivno se radi na uvođenju novih visoko energetski efikasnih izvora svjetlosti, a LED je tu daleko najbolje rješenje.

Navedeni razlozi opredjeljuju proizvođače da nastave sa poboljšanjima karakteristika, a projektante da se opredjeljuju za izbor LED izvora pri predlaganju projektnih rješenja.

Literatura

- [1] P. Radulović, "Ventilacija saobraćajnih tunela", Magistarski rad Podgorica 2012.
- [2] Vladimir Radulović, "LED rasvjeta tunela, primjer tunel Budoš na putu Podgorica Nikšić", *Informacione tehnologije, Žabljak*, 2017.,
- [3] Liao Shuguang, *An optimal model for tunnel lighting control systems*, 2015.,
<https://www.semanticscholar.org/paper/An-optimal-model-for-tunnel-lighting-control-Shuguang/4661b43020b210096743bc94c05c060f826ec80b>
- [4] Prof. Dr. Miomir Kostić, "Vodič kroz svet tehnike osvetljenja", Beograd, 2000.,
- [5] Ana Drndarević, *Minel -Schröder, Beograd, Osnovne smernice za projektovanje tunelskog osvetljenja, predavanje u ICG, 2015.*,
- [6] CEN, "Road Lighting", EN 13201, 2003.,
- [7] Vladimir Đurišić, *Glavni projekat rekonstrukcije instalacije osvetljenja tunela Budoš, "S.P.A.K" d.o.o., Podgorica, 2015.*,
- [8] Andrej Djuretić, *Minel -Schröder, Beograd, Istine i zablude o LED tehnologiji, Beograd*,
- [9] Andrej Djuretić, *Minel -Schröder, Beograd, Tehno-ekonomska analiza avjetlosnih izvora za određivanje opravdanosti zamjene Na sijalica visokog pritiska LED izvorima, Beograd, 2010.*,
Schröder UPD interna baza podataka, https://upd.schreder.net,
- [10] Philips Xitanium outdoor LED drivers, *LED Driver datasheets, Mart 2017.*,
www.lighting.philips.co.uk/oem-emea/support/technical-downloads,
- [11] "Lighting the way: Perspectives on the global lighting market", *McKinsey analiza, 2. izdanje, Avgust 2012.*,
https://www.mckinsey.de/files/Lighting_the_way_Perspectives_on_global_lighting_market_2012.pdf,
- [12] „Tunelska kontrola“, prezentacija za klijente, Podgorica, April 2016.,
- [13] „Smart tunnel lighting management“, *Smart Tunnel Lighting - Schröder internal seminar, Maj 2017.*,
- [14] „Full Tunnel Solution – Complete segment approach“, *Schröder/Phoenix Contact International Sales Convention, Jun 2016.*,
- [15] „Tunnels and Underpasses“, *Schröder brochure, April 2016.*, www.schreder.com,
- [16] „Programabilni LED drajveri“, *Minel-Schröder interna prezentacija, Novembar 2016.*,
- [17] „Tunnel Lighting Protocols - requirements“, *Schröder internal seminar, Avgust 2012.* ,
- [18] „INTERBUS System Technology Basics“, *Steven Engineering Inc., 1997.*,
www.stevenengineering.com,
- [19] Jasmin Velagić, „SCADA sistemi“, *Predmet: Distribuirani sistemi, Elektrotehnički Fakultet Sarajevo 2012/2013.*,
<http://people.etf.unsa.ba/~jvelagic/laras/dok/lekcijad12.pdf>.
- [20] Canan Perdahci, *Tunnel Lighting with LED, 7th International Ege Energy Symposium, June, Turkey, 2014.*,
- [21] *Javno Preduzeće Putevi Srbije, Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji, Beograd 2012.*
- [22] Dalby A.: *Signal Transmission on Power Lines-Analysis of Power Line Circuits, Proceedings of the 1997 International Symposium on Power Line Communications and its Applications, Essen 2.-4.April 1998, pp. 37-44.*
<https://core.ac.uk/display/13739611>

- [23] Radomir Stojanović, Elektrotehnički fakultet, Podgorica **DALI STANDARD U SISTEMU UŠTEDE ENERGIJE (DALI STANDARD WITHIN ENERGY SAVING SYSTEM)**, INFOTEH-JAHORINA, Match 2006.
<https://infoteh.etf.ues.rs.ba/zbornik/2006/radovi/D/D-11.doc>
- [24] Tunel Budoš
<https://l.facebook.com/tunelbudos>
- [25] Osnove saobraćajnica , SISTEM vozač-vozilo-okolina, predavanje
https://www.ucq.ac.me/skladiste/blog_12590/objava_31611/fajlovi/IX_predavanje.pdf
- [26] Sistem daljinskog upravljanja i nadzora
http://www.inqkomora.me/ikcq_sajt/cms/public/image/uploads/Prezentacija_Elektrotehnicki_sistemi_na_autocesti
- [27] „Intelligent tunnel lighting solutions“, Schréder brochure, April 2016., www.schreder.com,
- [28] „Basic tunnel solution (BTS)“, Schréder brochure, April 2016., www.schreder.com.