

# ANALIZA RIZIKA NAPAJANJA TUNELSKJE PUTNE INFRASTRUKTURE

## RISK ANALYSIS OF TUNNEL INFRASTRUCTURE ENERGY SUPPLY

Miodrag ZDRAVKOVIĆ, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Ogranak Vranje  
Aleksandar JANJIĆ, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

### KRATAK SADRŽAJ

Poslednjih godina su značajno povećane aktivnosti u izgradnji putne infrastrukture, ali se prilikom izrade planova njihovog napajanja električnom energijom javljaju i određene poteškoće, naročito pri napajanju tunela. U srpskim standardima i tehničkim preporukama Elektrodistribucije Srbije nije definisan način polaganja u ovakvim slučajevima. Za potrebe napajanja električnom energijom objekata putne infrastrukture (tunela, naplatnih stanica, tunelskog operativnog centra, osvetljenja i dr), godine 2019. je izgrađen kablovski vod od TS 35/10 „Vladičin Han 1“ do TS 35/10 „Momin Kamen“, čija se trasa pruža kroz tunel Manajle u dužini od 1800m. Izgradnja ovog tunela bila je glavni motiv za analizu različitih pristupa planiranju. U ovom radu je izvršena analiza mogućih rizika za različite varijante napajanja u smislu: dubine polaganja, ukrštanja i paralelnog vođenja u odnosu na druge instalacije u tunelu, kao i održavanje samog voda. Data je i tehnoeekonomska analiza i uporedne cene troškova ovog voda u odnosu na odgovarajući nadzemni vod istog naponskog nivoa

**Ključne reči:** analiza rizika, napajanje tunela, tehnoeekonomska analiza

### ABSTRACT

Activities in the construction of road infrastructure have increased significantly in recent years, but there are also some difficulties in drawing up plans for their electricity supply, especially when powering tunnels. The Serbian Standards and Technical Recommendations of the Electricity Distribution of Serbia do not define the manner of laying in such cases.

For the purposes of electricity supply to the facilities of road infrastructure (tunnels, toll stations, tunnel operating center, lighting, etc.), in 2019 a cable line was constructed from TS 35/10 "Vladičin Han 1" to TS 35/10 "Momin Kamen". whose route extends through the Kržince tunnel in the length of 1800m. The construction of this tunnel was a major motive for analyzing different approaches to planning.

This paper analyzes the possible risks for different power variants in terms of depth of laying, crossing and parallel guidance with respect to other installations in the tunnel, as well as maintaining the conduit itself. Techno-economic analysis and comparative cost prices of this line with respect to the corresponding overhead line of the same voltage level are also given.

**Key words:** risk analysis, tunnel energy supply, technoeconomic analysis

Elektrodistribucija Vranje  
Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš

### UVOD

Putni, železnički i dugi pešački tuneli zahtevaju značajnu količinu električne energije i snage za bezbedan rad. Tunelska infrastruktura se obično napaja iz distributivne mreže, ali tuneli moraju sigurno da rade i u slučaju nestanka napajanja, pa se kod velikih tunelskih sistema gotovo uvek obezbeđuje rezervno napajanje. Ne postoji nijedan pojedinačni element za koji se može reći da je najvažniji u planiranju napajanja tunela, već koordinacija operativnih i sigurnosnih sistema osigurava integrisan, pouzdan i efikasan rad u normalnim i vanrednim uslovima.

Sigurnosni sistemi tunela uključuju: sistem upozorenja, nadzor, kontrolu saobraćaja, automatsku detekciju incidenta, automatsku detekciju vatre i dima, hitnu komunikaciju fiksnim i mobilnim telefonima, zvučne sisteme upozorenja, osvetljenje za normalne i vanredne uslove, ventilaciju, zaslone i zaklopke za regulaciju kvaliteta vazduha i upravljanje dimom u normalnim uslovima i uslovima evakuacije i gašenja požara, fiksne sisteme za gašenje požara i pumpe. Očigledno je da je neophodna električna kablovska instalacija za povezivanje sve ove opreme i da je pouzdan rad instalacije direktno vezan za pouzdane performanse svih operativnih i sigurnosnih sistema tunela.

Pored napajanja energetske infrastrukture u tunelu, posebno je važno i napajanje transformatorskih stanica viših napona, koje se nalaze van tunela (npr. TS 35/10 kV koje napajaju TS 10/0,4 kV u tunelu). Zbog sigurnosti napajanja, treba odrediti najbolje rešenje koje neće ugroziti napajanje i u vanrednim situacijama. Vanredni događaji u tunelima obuhvataju mnogo pojedinačnih uzroka, kao što su: zemljotres, poplava, udesi, terorizam, ali je možda najzahtevnija zaštita od požara. Vatra može da ugrozi ljuske živote čak i ako su udaljeni od izvora vatre, ne zbog toplote, već od sekundarnih efekata dima i toksičnih gasova. Zbog toga je pri planiranju napajanja tunela nužno sprovoditi principe integrisanog upravljanja požarima.

Za potrebe napajanja električnom energijom objekata putne infrastrukture (tunela, naplatnih stanica, tunelskog operativnog centra, osvetljenja i dr), godine 2019. je izgrađen kablovski vod od TS 35/10 „Vladičin Han 1“ do TS 35/10 „Momin Kamen“, čija se trasa pruža kroz tunel Manajle u dužini od 1800m. Izgradnja ovog tunela bila je glavni motiv za analizu različitih pristupa planiranju i analizu opravdanosti postavljanja kablovskog voda 35 kV u samom tunelu. Uporedna analiza ovog rešenja i alternativnog rešenja napajanja TS 35/10 kV „Momin Kamen“ nadzemnim 35 kV vodom data je u nastavku ovog rada.

## **ANALIZA RIZIKA**

Analiza rizika obuhvata razmatranje uzroka i izvor rizika, njihove pozitivne i negativne posledice, kao i verovatnoću posledica do kojih može doći. Treba identifikovati faktore koji utiču na posledice i verovatnoću. Rizik se analizira utvrđivanjem posledica, verovatnoće nastanka i drugih atributa rizika. Događaj može imati višestruke posledice i može delovati na više objekata. Postojanje kontrole i njene efikasnosti i efektivnosti takođe treba uzeti u obzir.

Način na koji se verovatnoća i posledice izražavaju i način na koji se kombinuju da bi se odredio nivo rizika određuju nivo rizika, informaciju koja je dostupna i svrhu za koju se rezultat procene rizika koristi. Takođe je važno razmotriti međuzavisnost različitih rizika i njihovih uzroka. Pouzdanost u određivanje nivoa rizika i njihovu osetljivost na preduslove i pretpostavke treba razmatrati u analizi i efektivnoj komunikaciji između procenjivača rizika i po potrebi drugih zainteresovanih strana.

Analiza rizika napajanja tunelske infrastrukture sadrži mnogo faktora koji određuju tehničke zahteve za planiranje izgradnje ili dogradnje postojećeg voda, kao i izbor nadzemne ili podzemne varijante za napajanje tunela, a to su:

- Zaštita životne sredine
- Vremenski uslovi
- Uticaj na mrežu
- Uklapanje u postojeću mrežu
- Pouzdanost i stabilnost napajanja
- Maksimalni prihvatljivi nivoi električnog i magnetnog polja
- Troškovi izgradnje i održavanja
- Bezbednost

### **Zaštita životne sredine**

Ograničenja zaštite životne sredine tiču se zakonskih zahteva, politike u pogledu pitanja zaštite životne sredine, ali i javnih i privatnih interesa građana. Trajni ili privremeni efekat novog nadzemnog ili podzemnog voda može biti kvantifikovan, ali reakcija javnosti na projekat ponekad može biti emocionalna. Stoga je evaluacija uticaja takvih projekata na životnu sredinu prilično složena i uključuje mnogo aspekata, od kojih se većina može razmotriti i analizirati samo kvalitativno. Ova analiza uključuje uticaj magnetnih i u manjoj meri električnih polja s odgovarajućim ograničenjima izloženosti, amortizaciju zeljišta i ograničenja zemljišne upotrebe, ali i vizuelni uticaj za nadzemne vodove. Takođe, jedno od ekoloških ograničenja je i priroda regiona: Nadzemni vod koji prolazi preko vode ili šume može biti složeniji i skuplji u poređenju s podzemnim rešenjem.

## **Vremenski uslovi**

Vremenske prilike mogu imati ozbiljan uticaj na elektroenergetske sisteme i mogu uzrokovati nestanak struje koji može trajati nedeljama i mesecima. Nadzemni vodovi su obično ekonomičniji, ali podložni su oštećenjima usled vetrova, grana drveta i leda. Za napajanje tunela, svakako treba imati u vidu i vreme posebno za uspostavljanje rezervnog napajanja u slučaju većih vremenih nepogoda.

## **Uticaj na mrežu**

Zbog kapacitivnosti kablova i potrebne reaktivne energije, kablovi su uvek manje strujne nosivosti od nadzemnih vodova. Sa druge strane, zbog manje redne impedanse, u paralelnom radu sa nadzemnim vodom, može doći do preopterećenja kablova. Prenaponi moraju da budu pažljivo analizirani za kablovske vodove, pogotovu ako se kablovska deonica kroz tunel povezuje sa nadzemnim vodovima izvan tunela.

## **Uklapanje u postojeću mrežu**

Deonica kablovskog voda kroz tunel može se priključiti na postojeću mrežu na dva načina: priključkom na nadzemni vod ili priključkom u razvodnom postrojenju. Razvodno postrojenje je skuplje rešenje, ali omogućava veći broj priključnih vodova i druge opreme potrebne za njihovu zaštitu i upravljanje. Moguće je razmotriti i varijantu da ne dolazi do prekida voda, već da se ceo priključni vod gradi kao kablovski.

## **Pouzdanost i stabilnost napajanja**

Iako su oba voda (nadzemni i podzemni) konstruktivno maksimalno pouzdani, spoljašnji uticaji su različiti. Nadzemni vod mnogo je više izložen spoljašnjim vremenskim uslovima. U slučaju kvarova, lakše je pronaći kvar na nadzemnim vodovima i proces restauracije može mnogo brže da se realizuje. Kvar na XLPE kablovima može trajati 5-9 dana na osnovu faktora kao što su stanje opreme, dostupnost zamene, jednostavnost pristupa i stručnost radnika.

## **Elektro-magnetna polja**

Podzemni kablovi se odlikuju velikom blizinom provodnika različitih faza, što dovodi do manje vrednosti elektro-magnetnih polja oko kabla. Na nivou zemlje, polje takođe opada mnogo brže nego kod nadzemnog voda, ali može da bude veće pri malim odstojanjima od kabla. Za naponske nivoe koji će biti analizirani u radu (35 kV) ovaj kriterijum praktično ne utiče mnogo na konačno rešenje.

## **Poređenje troškova**

Raspoloživost opreme, jednostavnost gradnje, stalni pristup i stručnost čine troškove izgradnje nadzemnih vodova nižim od onih za podzemne vodove. Kablovski vod zahteva kopanje rovova, izgradnju kanala i postavljanje spojnica što podiže cenu podzemne instalacije. Međutim, nadzemne linije mogu da iziskuju izgradnju pristupnih puteva i platformi za temelje nadzemne konstrukcije.

Ostali aspekti troškova kao što su održavanje, popravka, gubici, uticaj na životnu sredinu i kvarovi, takođe treba da se uračunaju.

## **Bezbednost**

U zatvorenim prostorima, kao što su putni, železnički, pešački tuneli, podzemna parkirališta, podzemni šoping centri, itd. toplota usled požara ne može da se evakuiše tako lako kao što se može nad zemljom. Nakup dima i toplote može biti brži nego kod nadzemnih struktura i u daleko manje vremena. Zbog toga je u nekim zemljama često uslov pri projektovanju da otpornost na požar konstrukcija, opreme i sistema bude veća od standardnih kriva temperatura - vreme. Koriste se i noviji protokoli ispitivanja prema: SRPS EN 1363-2 [1]. Ovaj standard utvrđuje dodatne uslove zagrevanja i ostale postupke koji mogu biti neophodni u specijalnim okolnostima. Standard se mora koristiti zajedno sa EN 1363-1. Ako se ne zahtevaju posebni uslovi zagrevanja, mora se

koristiti standardna kriva temperatura-vreme koja je data u EN 1363-1. Primeri dobre prakse su i britanski standard BS476, australijski standard AS / NZS1530 ili nemački RABT-ZTV.



SLIKA 1. POSLEDICE POŽARA U TUNELU MON BLAN 1999. GODINE

Najveći broj kablova izgrađen je od ugljovodoničnih polimera. Nekad se posebno postavljaju plaštovi kablova sa sporogorećim materijalima, ali ostali delovi izolacije, pogotovu u uslovima preopterećenja ili kratkih spojeva nemaju ta svojstva. Polietilen (čak i da je bez halogena) može da predstavlja veoma veliki izvor rizika, jer u slučaju požara troši mnogo kiseonika i oslobađa znatno više ugljen monoksida (CO) i ugljendioksida (CO<sub>2</sub>) koji doprinose porastu temperature, širenju požara i gušenju.

Postavljanje kablova u cevovod ne rešava problem zbog raspadanja polimera unutar cevi. Posledica toga je da se širi dim, otrovni i zapaljivi gasovi ugljovodonika duž cevi, i to na opremu i razvodne table na kojima bilo koja varnica, u slučaju rada prekidača ili releja može da zapali gasove koji šire požar.

Jedno dobro rešenje je postavljanje kablova sa neorganskom izolacijom sa magnezijum-oksikom i plaštovima od bakra. Ovi kablovi ne oslobađaju toplotu i ne mogu da učestvuju u širenju požara. Ne proizvode dim, nema toksičnosti i zapaljivih gasova uopšte. Drugo od mogućih projektnih rešenja je polaganje kablova u rovove koji se zatrpavaju peskom ili postavljanje kablovskih kanala iza zona vatrootpornih obloga tunela.

Svi prethodno pomenuti elementi rizika biće objašnjeni na praktičnoj studiji slučaja: izboru trase i tipa napajanja TS 35/10 kV „Momin Kamen“.

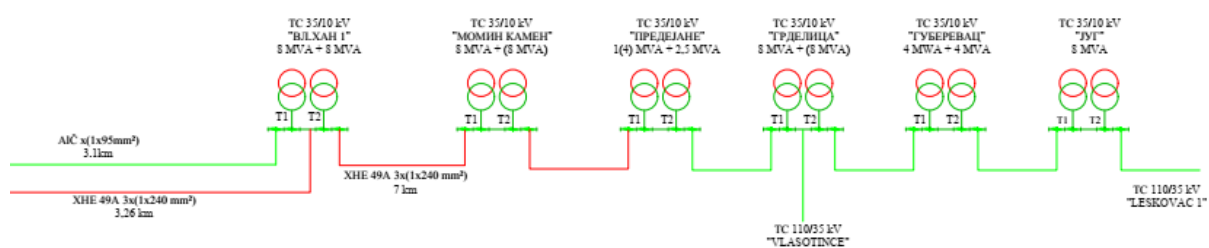
## STUDIJA SLUČAJA

### Napajanje tunela

Na deonici autoputa E-75 Beograd – Niš - Preševo, od km 892+519.91 do km 894+328.61 (poddeonica 2; tunel „Manajle“) za potrebe JP Putevi Srbije ali i drugih preduzeća planirana je izgradnja kablovske kanalizacije prilikom izgradnje samog puta, odnosno tunela. Sam objekat tunela se sastoji od dve tunelske cevi koje su međusobno povezane poprečnim rovovima za evakuaciju. Desna tunelska cev je dužine 1.808,70 metara. Leva tunelska cev je dužine 1.800,00 metara. Obe tunelske cevi imaju istu širinu kolovoza  $L = 7.70\text{m}$ , a ova širina se sastoji iz dve vozne trake širine 3.50m, i ivičnih traka.

Za potrebe napajanja električnom energijom tunela Manajle izgrađena je transformatorska stanica TS 35/10 kV „Momin Kamen“ i kablovski vod 35 kV od Vladičinog Hana do Mominog Kamena.

Jednopolna šema napajanja data je na sledećoj slici:



SLIKA 2 JEDNPOLNA ŠEMA NAPAJANJA TS 35 /10 KV MOMIN KAMEN

Iz trafostanice TS 35/10 „Momin Kamen“ se kablovskim vodovima 10 kV napajaju putne transformatorske stanice TS 10/0,4 kV, raspoređene na sledeći način:

- TS5 je postavljena u okviru Tehničkog centra u blizini ulaznog portala leve tunelske cevi tunela „Manajle”,
- TS 6 je locirana u okviru platoa na kom se nalazi naplatna kapija petlje „Vladičin Han”.

Tunelske TS locirane su u pešačkim prohodnim hodnicima, koji se nalaze sa leve strane tunelske cevi gledano u smeru vožnje.

- Tunelska TS3 se nalazi u pešačkom hodniku br. 2,
- TS4 u pešačkom hodniku br. 7, gledano u smeru rastuće stacionaže (poddeonica 2).

Priključne tačke kablovskog voda su:

- Početna tačka TS3 10/0,4 kV „Manajle“ ćelija 10 kV
- Krajnja tačka TS5 10/0,4 kV u Tehničkom centru, ćelija 10 kV

Tunel „Manajle” i Tehnički centar se u redovnom pogonu napajaju iz TS 35/10kV „Momin kamen“ preko TS3, TS4 i TS5 koje se nalaze na pomenutim lokacijama. Pomenute TS su „prolazne“ i napajaju se po principu „ulaz-izlaz“ sa projektovanog kablovskog voda 10kV. Osvetljenje petlje i naplatna stanica „Vladičin Han“ se u redovnom pogonu napajaju iz TS 35/10 kV „Vladičin Han 1“ preko TS6.

Alternativno napajanje tunela „Manajle” i Tehničkog centra predviđeno je poveznim vodom iz pravca TS6 koji se napaja iz TS 35/10kV „Vladičin Han 1“, dok je alternativno napajanje osvetljenja petlje i naplatne stanice „Vladičin Han“ predviđeno iz pravca TS5 koja se napaja iz TS 35/10kV „Momin Kamen”.

Uklopno stanje deonica prstenastog voda nadzire se u kontrolnoj prostoriji Tunelskog operativnog centra. Za prenos informacija o uklopnom stanju (položajna signalizacija) u napojnim i tunelskim TS predviđen je telekomunikacioni vod položen u rovu sa projektovanim napojnim energetske kablovima.

Zaštita kablovskog voda 10 kV predviđena je u napojnoj TS 35/10 kV i to kao prekostrujna, kratkospojna i zemljospojna zaštita.

Najveći problem prilikom planiranja konačnog rešenja napajanja bio je upravo izbor tipa 35 kV voda za napajanje TS 35 /10 kV “Momin Kamen”. Poređenje ovih alternativa dato je u nastavku.

### Izbor 35 kV voda

Razmatrane su dve alternative: nadzemni 35 kV vod, ili kablovski vod koji bi delom prolazio kroz sam tunel.

Alternativa sa kablovskim vodom predviđala je polaganje kablova unutar tunelskih kanala, i PVC cevi ispod kolovoza.. Unutar „Tunela Manajle“ kabl 35 kV se vodi ispod pešačke/revizione staze koja se nalazi sa leve strane tunelske cevi. Prikaz planirane kablovske trase unutar tunela prikazan je na slici 3.



SLIKA 3 UNUTRAŠNOST TUNELA “MANAJLE” U FAZI IZVOĐENJA RADOVA

U poređna analiza troškova pokazala je da je prednost na strani kablovske varijante. Ovaj rezultat bio je neočekivan, imajući u vidu da su prosečni troškovi polaganja kabla obično veći od nadzemne varijante.

Međutim, izrazito nepovoljna konfiguracija terena pokazala je da izgradnja nadzemnog voda iziskuje veliki broj zateznih stubova, povećane troškove građevinskih radova. Usporedna analiza troškova data je u tabeli 1.

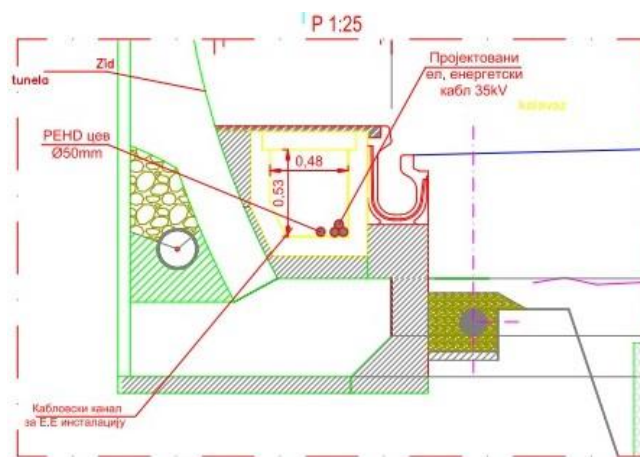
TABELA 1. ANALIZA TROŠKOVA IZGRADNJE KABLOVSKOG VODA U ODNOSU NA NADZEMNI

	OPIS RADOVA	NADZEMNI	PODZEMNI
1.	Pripremno završni radovi	1.362.000	4.276.000
2.	Zemljani radovi	12.546.000	20.524.000
3.	Betonski i armiranobetonski	34.895.000	-
4.	Čelična konstrukcija	38.509.000	-
5.	Elektromontažni materijal	10.217.000	40.725.000
6.	Montaža	8.871.000	10.018.000
7.	Naknada vlasnicima za zauzeće parcela	4.100.000	-
	svega	110.500.000	75.543.000 din.

Kablovska varijanta pokazala je bolje rezultate i što se tiče analize pod tačkama 2.1 (zaštita životne sredine), 2.2.(vremenski uslovi) i 2.5. (pouzdanost napajanja). Analizom tačke 2.3. (uticaj na mrežu) nije primećen pogoršani uticaj, pogotovu što je odabrana varijanta da celokupni vod od TS 35/10 kV Vladičin Han – TS 35 /10 kV Momin Kamen bude kablovski vod, tako da se smanjuje mogućnost prenapona i prelazaka sa kablovskog na nadzemni vod. Pouzdanost napajanja (tačka 2.5.) dodatno je poboljšana ugradnjom dizel električnog agregata, napona 10 kV, koji preuzima napajanje u slučaju kvara na TS 35/10 kV Momin Kamen ili na priključnomvodu. Već je napomenuto da je predviđen i rezervni 35 kV vod TS 35/10 kV Momin Kamen – TS 35 /10 kV Predejane (slika 1). Ovaj vod je ukupne dužine oko 10 km, i predviđen je kao kombinacija kablovskog i nadzemnog voda. Uslovi bezbednosti (tačka 2.8) rešena je na taj način što je izabran električni razvod od kablova koji u slučaju požara ne razvijaju toksične, otrovne i zagušujuće gasove, ne potpomažu i ne prenose požar u skladu sa SRPS i IEC standardima [2-5].

Kada je reč o upravljanju energetskih objektima u tunelu, predloženo je da JP Putevi Srbije dobiju status operatora zatvorenog distributivnog sistema. Na taj način, biće moguće da se granice nadležnosti upravljanja pomere na 10 kV sabirnice u tunelskim TS 10/0,4 kV. Na ovaj način bi se stvorili preduslovi da se tunelske instalacije napajaju istovremeno iz oba pravca napajanja, odnosno da se granica napajanja definiše u nekoj od TS 10/0,4kV, čime bi se omogućila bolja funkcionalnost lokalne automatike za restauraciju napajanja.

Detalji polaganja kablova ispod pešačke staze prikazani su na slici 4.



SLIKA 4. DETALJ POLAGANJA 35 KV KABLA

## ZAKLJUČAK

Upravljanje rizikom pri planiranju napajanja tunelske infrastrukture podrazumeva identifikovanje, analizu i planiranje potencijalnih rizika (pozitivnih i negativnih) koji mogu uticati na projekat. Ovo znači minimizaciju verovatnoće dešavanja negativnih događaja i maksimizaciju verovatnoće dešavanja pozitivnih događaja po projekat. Analiza se koristi i za identifikaciju i svih pozitivnih posledica određenih rizika, kako bi se unapredio konačni učinak i efikasnije dostigli projektni ciljevi. Ključni zadatak prilikom analize rizika je taj da instalacije za napajanje tunela električnom energijom iz elektrodistributivne mreže moraju da budu izgrađene na takav

način da u slučaju opasnosti omoguće rad bezbednosne opreme tunela potrebne za uspešnu evakuaciju i zatvaranje tunela. Električna, merna, regulaciona i kontrolna kola projektuju se tako da kvar na električnoj mreži i kvar zbog požara ne utiču na neoštećena električna kola.

Ustaljeno mišljenje da je nadzemni vod jeftiniji za izgradnju od kablovskog je promenjeno, zbog promenjenih uslova na tržištu pre svega građevinskog sektora. Zbog toga je nužno sprovesti kompletnu tehno-ekonomsku analizu i analizu rizika čak i za tradicionalno primenjivana rešenja.

## **LITERATURA**

1. SPRS EN 1363-2 Ispitivanja otpornosti na požar — Deo 2: Alternativne i dodatne procedure Institut za Standardizaciju Srbije, 2010.
2. IEC 60331-1:2018
3. IEC 60331-2:2018
4. IEC 60332-3-21:2018
5. PRAVILNIK o osnovnim uslovima koje tunel na javnom putu mora da ispunjava sa gledišta bezbednosti saobraćaja i podobnosti puta za odvijanje saobraćaja Sl. glasnik RS", br. 121 od 24. decembra 2012.