

# Požari u tunelima

---

**Žakula, Manuela**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:607792>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-23**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Manuela Žakula

# **POŽARI U TUNELIMA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2017.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department  
Professional undergraduate study of Safety and Protection

Manuela Žakula

# **FIRES IN TUNNELS**

Final paper

Karlovac, 2017.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Manuela Žakula

# **POŽARI U TUNELIMA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: mr.sc. Snježana Kirin, viši pred.

Karlovac, 2017.



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Trg J.J.Strossmayera 9

HR-47000, Karlovac, Croatia

Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510

Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

**Stručni studij:** Stručni studij sigurnosti i zaštite

**Usmjerenje:** Zaštita od požara

Karlovac, 2017.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

**Student:** Manuela Žakula

**Matični broj:** 0416610736

**Naziv završnog rada:** Požari u tunelima

**Opis zadatka :** Pribaviti podatke o načinima nastanka požara, te gašenju požara u tunelima

**Zadatak zadan:**

10/2016

**Rok predaje rada:**

03/2017

**Predviđeni datum obrane**

03/2017

**Mentor:**

mr.sc. Snježana Kirin, viši pred.

**Predsjednik izbornog povjerenstva:**

dr.sc.Zvonimir Matusinović

## **PREDGOVOR**

Ovaj je završni rad pisan individualiziranim pristupom, koji podrazumijeva individualne sposobnosti i konkretno predznanje osnovne materije od strane autora rada. Rad sadrži osnove izgradnje tunela, vrste sustava zaštite od požara, vrste sustava provjetravanja i sprječavanja izbijanja požara u tunelu te postupanja u slučaju požara u tunelu. Izabranom koncepcijom ne izlazi se iz zadanih okvira. Rad sadrži mnogo shematskih prikaza, fotografija i korisnih sadržaja koji su do sada parcijalno obrađivani u domaćoj stručnoj literaturi. Rad je rezultat stečenog znanja autora tijekom pohađanja odjela Sigurnosti i zaštite na Veleučilištu u Karlovcu, te proučavanja niza domaćih i inozemnih stručno-znanstvenih materijala. Onima koji budu željeli proširiti svoja znanja iz područja tematike rada na raspolaganju je brojna literatura na kraju ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, profesorima Veleučilišta u Karlovcu, odjela Sigurnosti i zaštite, a posebno svojoj mentorici mr.sc. Snježani Kirin, viši pred., na kvalitetnom prenošenju znanja, trudu, ukazanom razumijevanju, trudu i potpori tijekom pisanja završnog rada. Zahvaljujem se i svim ostalim djelatnicima Veleučilišta u Karlovcu na pruženoj potpori i razumijevanju tijekom mog školovanja.

## SAŽETAK

Razinu ugroženosti sudionika u prometu teško je izraziti stoga što se ne mogu spoznati sve varijable koje izravno i neizravno ugrožavaju sve sudionike u određenoj situaciji. Bez obzira na odgovorno ponašanje pojedinaca tijekom vožnje, često su ti sudionici ugroženi zbog ponašanja i načina vožnje nekog drugog sudionika prometa ili više sile. Materijalni ekvivalent iliti posljedica te ugroze prometne su nesreće na cestama, pa i u tunelima koje mogu imati daleko ozbiljnije posljedice jer u tunelima vladaju posebni uvjeti sigurnosti te ponašanja u slučaju opasnosti. Širina i preglednost prometnica daju vozačima prividnu sigurnost i osjećaj kako se nesreću može izbjeći tehnikom i načinom vožnje, uvjerenje kako uvijek postoji neki prostor sigurnosti koji omogućuje bijeg iz incidentne, jako opasne situacije. Jedna je okolnost u prometu posve drugačija, a to je vožnja tunelom. Malo je vozača koji pri ulasku u tunel ne misle samo na jedno, da što prije iz njega i izađu. Naravno, sve to kod većine vozača, no ima i onih koji olako podcjenjuju vožnju tunelom.

Postoji niz realno opasnih situacija i problema koji se vozačima mogu dogoditi u tunelu, a nema se kuda pobjeći i uvijek valja imati na umu da tunel nije obična cesta. Zato i jesu posljedice takvih događanja, ali i ponašanja koja su do njih dovela strašne. Potencijalno su opasni i bezazleni zastoji u tunelima, kvarovi na vozilu, a da se o opasnoj vožnji, sudarima ili požarima u tunelima i ne govori. U svim tim situacijama od vozača se traži izuzetna ozbiljnost, pribranost i propisno reagiranje kako bi se izbjegle neželjene posljedice (nalijetanja vozila iza, u slučaju zastoja ili kvara na vozilu) ili ako je već do tragedije došlo, da se umanje posljedice od kojih su najozbiljnije one uslijed izbijanja požara u tunelu. Uvjeti izgradnje tunela, sustavi ventilacije tijekom izgradnje i prometovanja, postupanja u slučaju nesreća te izbijanja požara u tunelima su posve drugačiji nego li na bilo kojim drugim prometnicama. U Hrvatskoj i u svijetu se izgradnja tunela, kao i prometovanje i sigurnost smatra posebno važnom.

**Ključne riječi :** tunel, prometovanje, sustav provjetravanja, uvjeti izgradnje, požar.

## **SUMMARY**

The level of vulnerability of road users is difficult to express because they can not get to know all the variables that directly and indirectly threaten all participants in a given situation. Regardless of the responsible behavior of individuals while driving, often these parties threatened on account of behavior and ways of driving other traffic participants or force majeure. Material equivalent aka consequences and endanger traffic accidents on the roads, even in tunnels that can have far more serious consequences because the tunnels govern special conditions of safety and conduct in case of emergency. The width and transparency roads give drivers the apparent safety and a sense of how the accident can be avoided technique and driving style, the conviction that there is always some space security that allows an escape from the incident, a very dangerous situation. One circumstance in traffic completely different, and that is driving through a tunnel. There are few drivers who when entering the tunnel do not think only of one thing, that as soon as possible from it and come out. Of course, all this for most drivers, but there are those who easily underestimate driving through the tunnel.

There are a number of dangerous situations and real problems that drivers can happen in a tunnel, and there is nowhere left to run and should always be kept in mind that the tunnel is no ordinary road. That's why they are the consequences of such events, but the behaviors that led to them terrible. Potentially dangerous and harmless congestion in tunnels, faults on the vehicle, and that the dangerous driving, crashes or fires in tunnels and does not speak. In all these situations, the driver is required exceptional seriousness, composure and properly react to avoid unintended consequences (the force of the vehicle behind, in case of any problem or malfunction of the vehicle) or if it is already a tragedy occurred, to minimize the effects of which are the most serious one result of a fire in a tunnel. Terms of tunneling, ventilation systems during construction and operation, the procedure in the event of accidents and of a fire in the tunnels are completely different than on any other roads. In the Croatia and in the world, the construction of the tunnel, as well as the circulation and safety is considered especially important.



**Keywords:** tunnel, circulation, ventilation system, the conditions of construction, fire.

## SADRŽAJ

<b>ZADATAK ZAVRŠNOG RADA.....</b>	<b>I</b>
<b>PREDGOVOR .....</b>	<b>II</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>III</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>IV</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Predmet i cilj rada.....	1
1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja .....	1
<b>2. TUNEL KAO TEHNIČKO-TEHNOLOŠKA CJELINA.....</b>	<b>2</b>
2.1. Faktori sigurnosti u cestovnom tunelu .....	4
2.2. Temeljne aerodinamičke pojave u tunelu .....	5
2.3. Tunel Veliki Gložac.....	6
2.3.1. Cestovne karakteristike tunela Veliki Gložac.....	7
<b>3. OSNOVNE ZNAČAJKE POŽARA U TUNELIMA .....</b>	<b>8</b>
3.1. Uzroci najpoznatijih svjetskih požara u cestovnim tunelima .....	9
3.2. Rijkswaterstaat-ova (RWS) krivulja razvoja požara u tunelu .....	10
<b>4. SUSTAV ZA DETEKCIJU I DOJAVU POŽARA U TUNELIMA .....</b>	<b>11</b>
4.1. Sustav vatrodojave tunela Veliki Gložac.....	12
<b>5. SUSTAV DOJAVE POŽARA OPTIČKIM KABELOM.....</b>	<b>14</b>
5.1. Senzorski vatrodojavni optički kabel "Fast Response" .....	14
5.1.1. Mjerenje temperature zraka pomoću optičkih niti .....	14
5.1.2. Sustav za detekciju požara "Linear Heat Detector System" .....	15
5.1.3. Usporedba sustava ugrađenih optičkih kabela .....	16
5.1.4. Optički detektorski kabel .....	17
<b>6. CENTRALNI VATRODOJAVNI UREĐAJ .....</b>	<b>18</b>
6.1. Centralni vatrodojavni uređaj AlgoRex CI 1145.....	18
6.1.1. Povezivanje, način rada i uvjeti za alarmno stanje .....	18
<b>7. SUSTAV ZA MANUALNU DOJAVU POŽARA U TUNELU.....</b>	<b>20</b>
7.1. Ručni javljači požara.....	20
7.2. Kontaktni javljači vatrogasnih aparata .....	21

<b>8. AUTOMATSKA DOJAVA POŽARA U TRAFOSTANICAMA</b> .....	<b>23</b>
8.1. Optičko-termički adresabilni javljači požara.....	23
8.2. Svjetlosni indikatori prorade javljača požara.....	23
<b>9. VENTILACIJSKI SUSTAVI U TUNELIMA</b> .....	<b>25</b>
9.1. Prirodna ventilacija u tunelu .....	25
9.2. Uzdužna ventilacija u tunelu.....	26
9.3. Poprečna i polupoprečna ventilacija u tunelu .....	27
9.4. Ventilacija za kontrolu požara i dima .....	27
9.5. Požari pri projektiranju ventilacije i otpornosti konstrukcije tunela .....	29
<b>10. POŽARI U TUNELIMA</b> .....	<b>31</b>
10.1. Uvjeti ventilacije i izgaranja u tunelima .....	32
10.2. Razvoj, prijenos i širenje požara u tunelima .....	33
10.3. Utjecaj različitih načina ventilacije .....	36
<b>11. GAŠENJE POŽARA U TUNELIMA</b> .....	<b>38</b>
11.1. Sustavi za gašenje požara u tunelima .....	38
11.1.1. Hidratantska mreža .....	38
11.2. Sustav za evakuaciju osoba iz tunela.....	39
11.3. Sustav ozvučenja tunela.....	40
11.4. Sustav radio komunikacije u tunelima .....	40
11.5. Sustav neprekidne opskrbe električnom energijom u tunelima.....	41
11.6. Vatrogasne akcije i taktički nastup u tunelu.....	42
11.6.1. Požarni scenariji sa normalnim zapaljivim krutinama .....	43
11.6.2. Požarni scenariji sa zapaljivim tekućinama .....	44
11.6.3. Požarni scenariji sa zapaljivim plinovima .....	45
11.6.4. Požarni scenarij sa toksičnim zapaljivim tvarima.....	46
<b>12. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>47</b>
<b>POPIS PRILOGA</b> .....	<b>48</b>
<b>POPIS LITERATURE</b> .....	<b>50</b>

# **1. UVOD**

## **1.1. Predmet i cilj rada**

Predmet rada su mogućnosti i uvjeti nastanka požara u cestovnim tunelima. Rastuća pokretljivost i ubrzani razvitak volumena prometa u društvenim zajednicama pokazuju, da će izgradnja modernih i učinkovitih tunela još dugo biti aktualna. Pri tome se planiraju i konstruiraju sve duža i kompleksnija tunnelska postrojenja, ili moderniziraju postojeći tuneli. Uslijed teških prometnih nesreća s požarima i ozbiljnim materijalnim štetama, kao i gubicima ljudskih života, zadnjih godina pokrenute su brojne diskusije o sigurnosnim standardima u tunnelskim postrojenjima. Ova razmatranja danas se uglavnom kreću u smjeru projektiranja gradnje tunela. Sigurnosni standard tunela rukovodi se uvelike prema scenariju mogućih nesreća koje uključuju požar, budući da požar predstavlja najveći rizik po ljude, vozila i gradnju, uslijed prostornog ograničenja tunela i, s time povezanim, otežanim bijegom, spašavanjem i naknadnim popravcima. Cilj rada je ukazati na ulogu i nužnost oblikovanja sigurnih izlaza u hitnim slučajevima, izolacije požarnog opterećenja u prolazima za bijeg i spašavanje, te održanje funkcionalnosti električnih postrojenja, temeljnih sigurnosnih koncepata u podzemnim prometnim postrojenjima, odnosno ukazati na potencijalne opasnosti koje mogu dovesti do izbijanja požara u tunelu. U posljednje vrijeme tematika požara u tunelima nalazi svoju sve veću primjenu, a zaštita konstrukcije – betona, od drobljenja, na temelju vrlo brzog porasta temperature i visokog toplinskog unosa, kao i instaliranje učinkovitih odvoda dima, temelj su dobre izgradnje modernih tunela i prevencije nastanka požarnih situacija u tunelu.

## **1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja**

Kako bi se što kvalitetnije istražila problematika požara u tunelu, korišteni su različiti izvori podataka, od stručnih knjiga do internet stranica zaštite na radu, građevinarstva i prometa te diplomski i magistarski radovi na sličnu tematiku. Ovaj rad istražuje, proučava i analizira već postojeće podatke. Pri prezentaciji podataka korištene su znanstvene metode analize, klasifikacije i deskripcije.

## 2. TUNEL KAO TEHNIČKO-TEHNOLOŠKA CJELINA

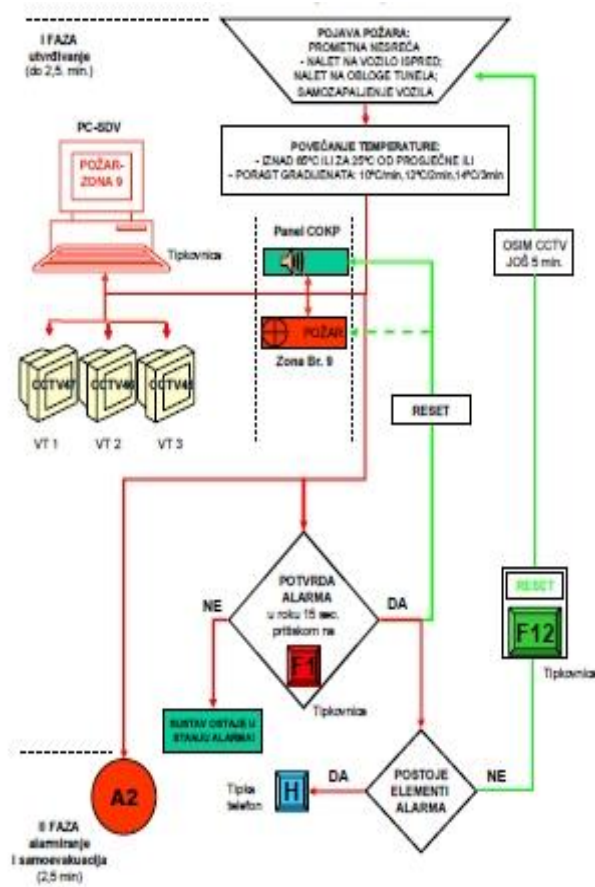
Prometne tunele općenito, a tako i cestovne tunele se ne može promatrati samo kao kapitalne građevinske objekte prometne infrastrukture, već oni predstavljaju i jedinstvenu tehničko-tehnološku cjelinu. Naglasak se posebno stavlja na karakteristiku tunela kao tehnološke cjeline, jer u njemu uređaji, oprema i sustavi obavljaju raznolike procese sa složenom interakcijom, kojima je zajednički cilj sigurno, neometano i efikasno odvijanja prometa.

Karakteristike cestovnog tunela kao složene tehničko-tehnološke cjeline su :

- veliki broj, različita pozicija i stupanj distribuiranosti (pod)sustava tunela
- različita autonomija rada i upravljanja sustavima
- visoki stupanj integracije i interakcije sustava
- složena konfiguracija sustava upravljanja i nadzora.

Svođenje širokog spektra različitih događaja u tunelu na simplificirane i sistematizirane grupe događaja, omogućava da se upravljanje tunelom obavlja korištenjem standardiziranih upravljačkih algoritama. Postupak sistematizacije događaja, od njihove identifikacije do uspostavljanja tipskih scenarija i odgovarajućih upravljačkih algoritama, obavlja se u sljedećim fazama :

1. Prepoznavanje događaja (identifikacija pojavnog oblika poput naleta vozila na oblogu tunela)
2. Razrada i analiza događaja (mogući sudionici, interakcija i događaji)
3. Simplifikacija događaja (određivanje mogućih sustava tunela koji reagiraju na događaj, vremenski slijed aktivnosti)
4. Grupiranje događaja (redovni pogon, akcidenti, održavanje, kvarovi)
5. Sistematiziranje događaja (kreiranje grupe događaja)
6. Standardiziranje postupanja (povezivanje različitih događaja s istovjetnom reakcijom pojedinih sustava tunela)
7. Tipski scenariji (tekstualni prikaz postupanja temeljem odgovarajućeg signala ili obavijesti, tzv. procedura)
8. Algoritmi upravljanja (grafički prikaz postupanja za utvrđene tipske scenarije u vidu blok dijagrama) [1]



Shematski prikaz 1: Postupanje u slučaju pokretanja požarnog alarma [1]

Iz navedenog proizlazi definicija tunela kao jedinstvenog tehničko - tehnološkog sustava koji koordiniranom i unaprijed utvrđenom promjenom svojih pogonskih stanja može odgovoriti na trenutne događaje u svom okružju. Navedena promjena pogonskih stanja treba se odvijati na način da pogoduje sigurnom i efikasnom odvijanju prometa, povećanju sigurnosti i zaštiti svih sudionika u prometu, kao i očuvanju građevine u cjelini. Hijerarhija upravljanja tunelom kao složenim tehničko-tehnološkim sustavom, kreće od operativne strategije rada pojedinih vitalnih sustava, koji u sinergijskom djelovanju predstavljaju jedinstvenu strategiju upravljanja tunelom kao sastavnim dijelom prometnice. Na vrhu piramide nalazi se sustav cjelovitog upravljanja prometnicom na temelju svih raspoloživih „on-line“ podataka, prognoza i baza podataka, tzv. Inteligentni prometni sustav. Njime se objedinjuje upravljanje prometom i svim raspoloživim tehničkim sustavima prometnice, a razina integracije se kreće od pojedinih lokalnih dionica autoceste do upravljanja nacionalnim i transnacionalnim cestovnim mrežama. Povezivanje rada svih raspoloživih sustava

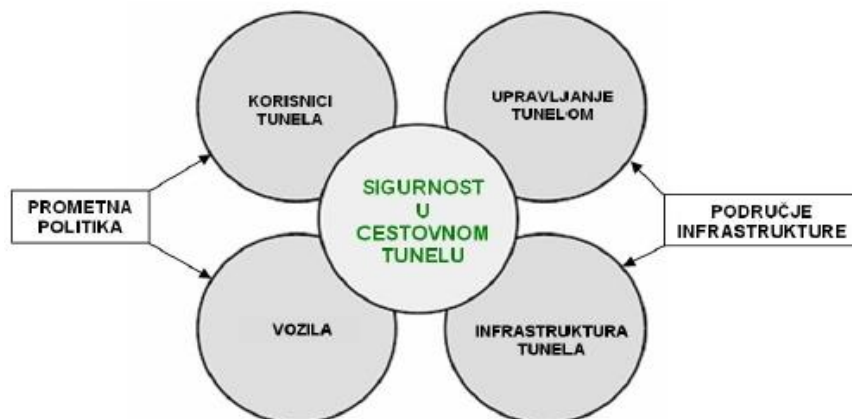
tunela u jedinstvenu operativnu strategiju, predstavlja složenu zadaću koja nadilazi rutinske projektantske vještine i znanja, te vrlo često zbog toga ostaje kao nedovršeni posao i dugo vremena nakon dovršetka gradnje i puštanja tunela u promet.

## 2.1. Faktori sigurnosti u cestovnom tunelu

Ključni faktori sigurnosti tunela grupirani su u dva glavna područja :

- **područje prometne politike** - obuhvaća ponašanje vozača u redovnim i incidentnim situacijama, obavještanje i odgovarajuću obuku vozača, politiku sankcioniranja prekršaja i devijantnih ponašanja u prometu i slično.
- **područje infrastrukture tunela** (u širem smislu) - obuhvaća sve one faktore koji utječu na pravilno i efikasno funkcioniranje tunela u organizacijskom i prometno-tehničkom smislu, kao što su geometrija tunela, broj cijevi, oprema i sustavi tunela (uključujući i ventilaciju), efikasnost pogona i slično.

Sustavi ventilacije cestovnih tunela, bez obzira na tip i izvedbu, spadaju u najznačajnije sustave koji svojom aktivnom ulogom participiraju u mjerama zaštite od požara. Kada je riječ o području infrastrukture tunela i njenoj ulozi u sigurnosnoj politici, potrebno je napomenuti da i ostali sustavi tunela moraju imati više ili manje razrađene scenarije djelovanja u uvjetima požara i sličnim incidentnim situacijama.



Shematski prikaz 2: Međuovisnosti ključnih faktora sigurnosti u cestovnom tunelu prema opće prihvaćenoj klasifikaciji UNECE [1]

Neodgovarajući pristup u definiranju pogonskih scenarija, kvaliteti, montaži ili održavanju sustava komplementarnih sustavu ventilacije, može čak dovesti u pitanje provođenje i najbolje osmišljene operativne strategije upravljanja sustavom

ventilacije. Ova činjenica se, prema mišljenju mnogih autora, vrlo često zanemaruje u inicijalnim fazama realizacije projektne zamisli, te ju je veoma teško ispraviti u kasnijim fazama, a pogotovo u eksploatacijskim uvjetima. Tako primjerice aktivno upravljanje uzdužnom brzinom zraka (dima) pomoću sustava ventilacije zahtjeva potpuno drugačiji kriterij za dimenzioniranje broja ventilatora od standardnog pristupa. Aktivno upravljanje uzdužnim strujanjem zraka pomoću sustava ventilacije zahtjeva u pravilu „bogatiju“ opremu kako u pogledu broja ventilatora, tako i u pogledu broja senzora u tunelu.

## **2.2. Temeljne aerodinamičke pojave**

Djelovanje sustava ventilacije u uvjetima požara očituje se prvenstveno na upravljanje raspodjelom dima unutar tunelskih cijevi, s ciljem da se osiguraju što povoljniji uvjeti putnicima za evakuaciju, a vatrogasno-spasilačkim ekipama za pravovremeni pristup unesrećenima i efikasno gašenje požara. Pod pojmom „kontrola raspodjele dima“ podrazumijeva se mogući utjecaj sustava ventilacije na dva ključna parametra, smjer i brzinu strujanja vruće zračne mase i dima. Raspodjela dima unutar tunelske cijevi podrazumijeva raznolike aerodinamičke pojave i efekte, koji nastaju interakcijom dima sa djelovanjem ventilacijskog sustava, građevinske konfiguracije i unutarnje strukture tunela. Poznavanje navedenih aerodinamičkih pojava i efekata, koji su u izravnoj vezi s termodinamičkim zakonitostima požarnog procesa, presudno je za oblikovanje efikasne operativne strategije rada ventilacijskog sustava u uvjetima požara. Temeljne aerodinamičke pojave i veličine su :

- stratifikacija dima
- odimljavanje i u vezi s njim tzv. „kritična brzina“
- povratno strujanje dima, tzv. „backlayering“

Stratifikacija dima predstavlja pojavu uzgonskog kretanja dima prema stropu tunela, uvjetovanog razlikom gustoće i topline dima i okolnog hladnijeg zraka, te u idealnim uvjetima, kada je protok (uzdužna brzina) zraka, uzrokuje se ravnomjerno slojevito širenje dima uz strop simetrično na obje strane od mjesta požara slojevito širenje dima uz strop, simetrično na obje strane od mjesta požara.

Kod tunelskih požara, dim se s mjesta požara diže do tunelskog stropa, i dalje se širi duž tunelske cijevi sve dok ne izađe iz nje, odnosno iz njenog zatvorenog prostora, u

ovakvim situacijama, sustav provjetravanja se u pravilu koristi za kontrolu širenja generiranog dima i radi se o tzv. kritičnoj brzini.

Backlayering ("back-flow") je naziv za pojavu kada se dim kreće u suprotnom smjeru od strujanja zraka u tunelu. U praktičnom smislu to znači da se treba spriječiti backlayering ili dovoljno kontrolirati. Brzina provjetravanja potrebna za sprječavanje backlayeringa je poznata kao "kritična brzina". Za ponašanje backlayering učinaka dva su najvažnija faktora koji reguliraju ponašanje :

- oslobođena toplinska snaga požara (HRR)
- brzine provjetravanja.

Postoje brojni obrasci za proračun kritične brzine zraka, nazvani po njihovim autorima koji su se s vremenom razvijali i postajali sve složeniji, odnosno postajale su sve složenije jer se sve više varijabli uzimalo u obzir i jer se tražila veća preciznost izračuna i pouzdanost. Vrlo često su izrazi nepodesni za projektantsku praksu jer zahtijevaju ponovljene postupke. Za projektantske potrebe može se reći da za široko područje požarnih opterećenja, kritična brzina odimljavanja iznosi oko 3,0 m/s.[2]

### 2.3. Tunel Veliki Gložac

Tunel Veliki Gložac (slika 1) nalazi se na dionici autoceste Rijeka – Zagreb A6 između cestovnih čvorova Vrbovsko i Bosiljevo 2. Autocesta A6 dio je međunarodnog cestovnog pravca E65 koji povezuje Rijeku i Zagreb sa mrežom autocesta Centralne i Zapadne Europe. Autocestom Rijeka–Zagreb upravlja trgovačko društvo Autocesta Rijeka-Zagreb d.d. sa sjedištem u Zagrebu koje je ujedno i zaduženo za održavanje svih cestovnih objekata pa tako i tunela.



Slika 1: Tunel Veliki Gložac (južna cijev) [3]



### 2.3.1. Cestovne karakteristike tunela Veliki Gložac

#### LIJEVA CIJEV

• Dužina	L=1130 m
• Širina voznog traka	B=2 x 3,50 m
• Širina rubnog traka	b=2 x 0,35 m
• Širina uzdignutog prolaza	b1=2 x 0,75 m
• Visina osi tunela	H=6,85 m
• Broj voznih traka	2
• Smjer prometa	jednosmjerni
• Maksimalni protok vozila	>20.000 vozila/dan
• Maksimalna brzina	80 km/h
• Površinska obrada	habajući sloj 4 cm

#### DESNA CIJEV

• Dužina	L=1126 m
• Širina voznog traka	B=2 x 3,50 m
• Širina rubnog traka	b=2 x 0,35 m
• Širina uzdignutog prolaza	b1=2 x 0,75 m
• Visina osi tunela	H=6,85 m
• Broj voznih traka	2
• Smjer prometa	jednosmjerni
• Maksimalni protok vozila	>20.000 vozila/dan
• Maksimalna brzina	80 km/h
• Površinska obrada	habajući sloj 4 cm

### 3. OSNOVNE ZNAČAJKE POŽARA U TUNELIMA

Europska statistika pokazuje da je najčešći uzrok manjih požara u tunelima vezan za tehničke kvarove na vozilima, a uzroci katastrofalnih požara su nesreće u kojima sudjeluje dva ili više vozila. Iskustva dosadašnjih požara u cestovnim tunelima (Mont Blanc, Tauern) pokazuju da u slučaju veće nesreće, u kojoj sudjeluju teretna vozila sa teretom, dolazi do povećanja temperature uz oslobađanje velike količine dima što u konačnici otežava intervenciju. U Brusselesu je 1987. godine Komitet za cestovne tunele predložio normiranje tipičnih požara prema oslobođenoj toplinskoj energiji kao polazištu za projektiranje mjera zaštite od požara u tunelima. [3]

Tablica 1 - Rezultati mjerenja u napuštenom tunelu Repparfjord [3]

<b>VRSTA VOZILA</b>	<b>OSLOBOĐENA TOPLINA</b>	<b>KOLIČINA DIMA</b> m <sup>3</sup> /s
Malo putničko vozilo	2.5 MW	20
Veliko putničko vozilo	5 MW	30
Manje teretno vozilo	15 MW	50
Autobus	20 MW	50-60
Teretni kamion bez opasnih tvari	20-30 MW	50-80
Teretno vozilo natovareno drvom ili sličnim materijalom	Do 100 MW	Okolo 100
Autocisterna s benzinom	200-300 MW	200-300

Mjerenje je obavljeno 1992. godine u napuštenom tunelu Repparfjord u Norveškoj u sklopu projekta EUREKA EU 499 «FIRETUN», a rezultati mjerenja su poslužili kao osnovica za određivanje početnih parametara pri požarima vozila u tunelu. Rezultati mjerenja pokazuju da požari u tunelu zahtijevaju brz početak intervencije s određenom vrstom sredstva za gašenje i opremom. Požari u tunelu praćeni su nizom specifičnih pojava, nepredviđenih situacija i opasnosti.

### 3.1. Uzroci najpoznatijih svjetskih požara u cestovnim tunelima

Kako bi se pokazala složena problematika gašenja požara u tunelima prikazat će se tijek i posljedice najpoznatijih požara u svjetskim tunelima.

- **Guadarrama, Španjolska** (14. kolovoz 1975., 3300 m): Požar kamiona cisterne koji je prevozio borovu smolu trajao 2h 45 min. Zgusnuti i vrlo toksični dim te vrlo visoka temperatura onemogućili su djelovanje vatrogasaca, žrtava nije bilo.
- **Caldecott, SAD** (17. travanj 1982., 1082 m): Pijani vozač udario je u autocisternu koja je prevozila 33000 l benzina, pri čemu su se zapalila oba vozila. Požar je zahvatio i druga vozila te trajao je 2h 45 min uz temperaturu od 1200 °C. Uništeno 580 m sekcije tunela, a 7 je osoba smrtno stradalo.
- **Gumefens, Švicarska** (18. veljače 1987., 340m): Uslijed poledice je došlo do lančanog sudara 3 kamiona i 5 osobnih vozila, te je uslijedio požar razlivenoga goriva, koji je trajao 2h. Smrtno su stradale 3 osobe.
- **Serra Ripoli, Italija** (1993. 442 m): Sudar osobnog automobila sa teretnim vozilom koje je prevozilo role papira rezultirao je požarom, koji je trajao 2h i 30 min zahvativši 14 kamiona i 11 osobnih vozila. Smrtno su stradala 4 putnika, a 5 ih je teško ozlijeđeno.
- **Pfander, Austrija** (10. travanj 1995., 6719 m): Lančani sudar više vozila pri čemu su se zapalila dva vozila, a u samo 7 minuta tunel je bio u potpunom dimu. Na mjesto sudara upućeno je jedno tunelsko vozilo, koje je teško oštećeno pri djelovanju visokih temperatura. Poginule su 3 osobe, a 20 ih je teško ozlijeđeno.
- **Mont Blanc, Francuska** (24. ožujak 1999., 11600 m): Ovaj je požar zabilježen kao najkatastrofalniji požar od 1945. godine sa 39 poginulih osoba. Požar je izbio na motoru kamiona, te se brzo proširio, a zbog tehničkog kvara na sustavu nadzora tunela, nije na vrijeme uočen. U tunelu su potpuno uništene sve instalacije i oplata u dužini nekoliko kilometara, a sanacija je trajala čak dvije i pol godine.
- **Tauern, Austrija** (29. svibanj, 1999., 6000 m): Kamion s teretom sprejeva naletio je na zaustavljenu kolonu u tunelu i uslijed snažnog udarca, 4 su vozila smrskana. Nakon 6h borbe sa gustim dimom i nemogućnošću dolaska do žarišta, prijetila je opasnost od urušavanja oplata tunela i akcija se zaustavila.

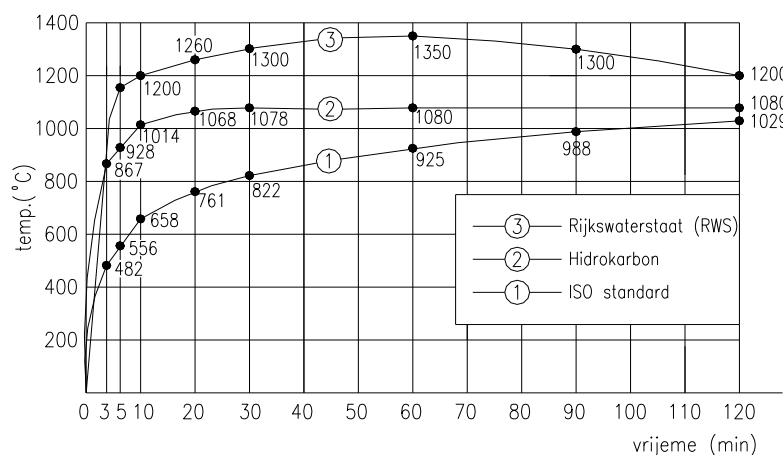


Slika 2 - Tunel Tauern nakon katastrofalnog požara [3]

Tek nakon upotrebe ventilatora koji je okrenuo smjer dima, gasitelji su stavili požar pod nadzor. Smrtno je stradalo 12 osoba, nakon čega je Vlada Austrije donijela odluku o izgradnji druge cijevi tunela.

### 3.2. Rijkswaterstaat-ova (RWS) krivulja razvoja požara u tunelu

Kretanje temperature, u ovisnosti o vremenu može se prikazati s različitim standardiziranim temperaturno-vremenskim krivuljama požara, s time da Rijkswaterstaat-ova (RWS) krivulja smatra najbližim prikazom razvoja požara u tunelu.



Grafički prikaz 1 - Rijkawaterstaatova požarna krivulja [3]

Krivulju karakterizira izrazito veliki gradijent temperature (porast od 1200°C unutar 10 minuta) s iznosom maksimalne temperature izrazito većim od svih drugih predloženih krivulja.

#### **4. SUSTAV ZA DETEKCIJU I DOJAVU POŽARA U TUNELIMA**

Bez obzira na korištenu tehnologiju, vatrodojavni detektori su najbitniji dio sustava jer je njihov pravilan odabir i smještaj preduvjet za rano otkrivanje požara. Grubom podjelom vatrodojavni detektori dijele se na detektore dima, detektore topline i detektore plamena. Suvremeni sustavi za detekciju požara u tunelima gotovo se isključivo temelje na detekciji promjene temperature, a ne detekcije dima ili plamena jer se sustavi za detekciju dima i plamena temelje na optičkoj detekciji, koja je u tunelskim uvjetima podložna prljanju, a time i smanjenju mogućnosti detekcije i smanjenju pouzdanosti sustava. Sustavi za detekciju požara, koji koriste svjetlovodno vlakno kao osjetnik, u konkretnoj primjeni imaju cijeli niz prednosti u odnosu na sustave s poluvodičkim osjetnicima.

Za održavanje integriteta svakog požarnog alarmnog sustava važno je imati kvalificirano osoblje koje periodički testira sustav. Vatrodojavni detektori su dizajnirani tako da im je potrebno što je moguće manje održavanja. Međutim, prašina, prljavština i druge strane tvari mogu se akumulirati unutar osjetilnog elementa detektora i promijeniti njegovu osjetljivost. On postaje ili više osjetljiv što može prouzročiti neželjeni alarm ili manje osjetljiv što će povećati vrijeme reagiranja u slučaju požara. Oboje je nepoželjno. Zbog toga, detektore treba periodički testirati i održavati u redovnim razmacima, te pratiti proizvođačke preporuke za testiranje i održavanje. Detektore treba vizualno provjeriti kod instalacije i najmanje dvaput na godinu da bi se uvjerali da je detektor fizički u dobrom stanju i da nema promjena koje bi mogle utjecati za karakteristike detektora kao što su greške u izradi, oštećenja i utjecaji okoline. Nužno je testirati osjetljivost svakog detektora po proizvođačkoj preporuci u roku od godine dana od instalacije, nakon toga svake dvije godine te testirati jednom godišnje funkcionalnost svakog detektora na njegovoj lokaciji. Ako je osjetljivost detektora unutar specificirane ne treba ništa drugo raditi na detektoru. Ako je osjetljivost izvan specificiranih granica treba zamijeniti detektor ili pratiti proceduru koju preporuča proizvođač, vratiti sustav u rad po završenom testiranju te obavijestiti ovlaštene službe da je testiranje završeno i da je sustav ponovo u radu. Da bi se uvjerali da je svaki vatrodojavni detektor u registriranim granicama osjetljivosti treba upotrijebiti:

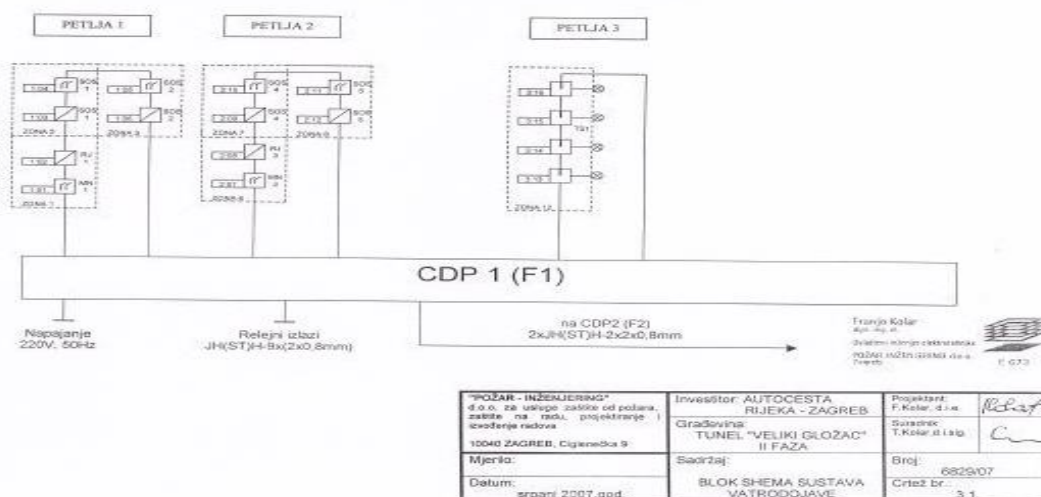
- kalibriranu metodu testiranja ili,

- proizvođački kalibrirani instrument za testiranje osjetljivosti ili,
- registriranu kontrolnu opremu napravljenu za tu svrhu ili,
- druge kalibrirane metode testiranja osjetljivosti tvrtki s autorskim pravom.

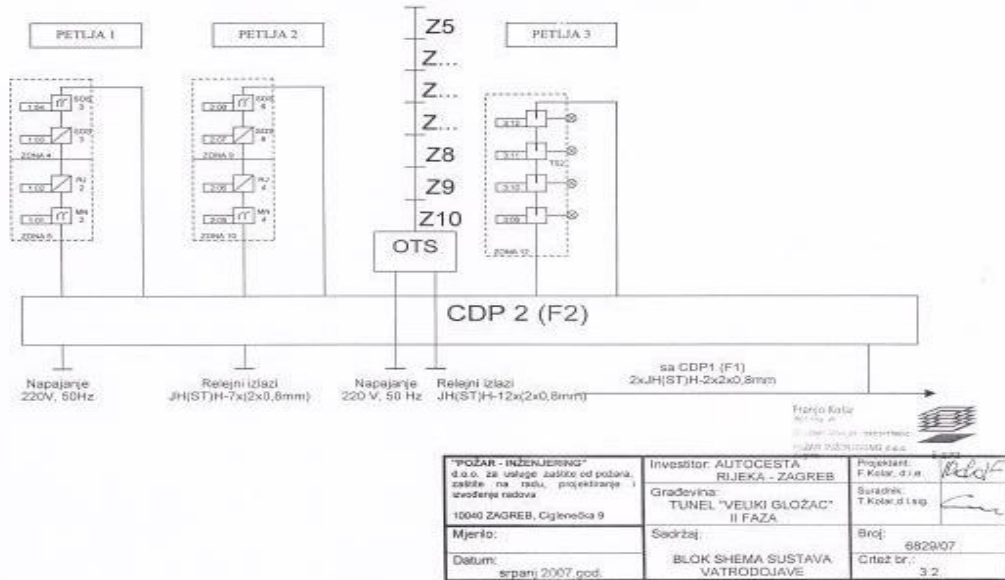
Detektori kojima se izmjeri osjetljivost 0,25%/m, ili su više izvan određenih granica osjetljivosti, trebaju se očistiti i ponovno kalibrirati ili zamijeniti, a potom vratiti u rad sustav nakon završetka testiranja.

#### 4.1. Sustav vatrodojave tunela Veliki Gložac

Sustav za dojavu požara u tunelu "Veliki Gložac" koncipiran je oko svjetlovodnog senzorskog kabela postavljenog na svod tunela. Na portalima tunela (sjeverni i južni portal) i SOS nišama postavljeni su ručni javljači požara dok su ostale prostorije tunelskih postrojenja opremljene automatskim javljačima požara. U pred-portalnim zonama kao i u SOS nišama postavljeni su ručni aparati sa suhim prahom za početno gašenje požara. Podizanje bilo kojeg protupožarnog aparata signalizira se na centralnom nadzornom sustavu vatrodojave u centru kontrole prometa. Na vatrodojavnu centralu CDP 1 spojene su tri alarmne petlje lijeve i desne zapadne polucijevi (polovica tunela).



Shematski prikaz 3 - Blok shema vatrodojave tunela Veliki Gložac – CDP1 [3]



Shematski prikaz 4 - Blok shema vatrodajave tunela Veliki Gložac – CDP2 [3]

Na vatrodajavnu centralu CDP 2 spojene su tri alarmne petlje lijeve i desne istočne polucije (polovica tunela), te optički vatrodajavni kabel.

## 5. SUSTAV DOJAVE POŽARA OPTIČKIM KABELOM

### 5.1. Senzorski vatrodojavni optički kabel "Fast Response"

U tunel "Veliki Gložac" ugrađena je nova generacija linearnog sustava za detekciju požara. U sustavu je napravljeno nekoliko unapređenja koja zajedno pridonose brzini detekcije odnosno smanjenju vremena odziva sustava. Napravljena je nova konstrukcija svjetlovodnog senzorskog kabela, iako se i dalje koriste dvije višemodne svjetlovodne niti koje su smještene unutar metalne cijevčice međutim vanjski plastični omotač crvene boje, zamijenjen je metalnim oplatom i tankim plastičnim zaštitnim omotačem crne boje. Vanjski promjer senzorskog kabela smanjen je s 8 mm na svega 4 mm. Ovim smanjenjem vanjskog promjera promjenom konstrukcije zaštitnog dijela, smanjena je temperaturna konstanta kabela i na taj način brže "osjeti" promjenu temperature okoline. Crna boja plašta, umjesto crvene, dodatno pridonosi brzini odziva boljom apsorpcijom radijacijske komponente temperature.

#### 5.1.1. Mjerenje temperature zraka pomoću optičkih niti

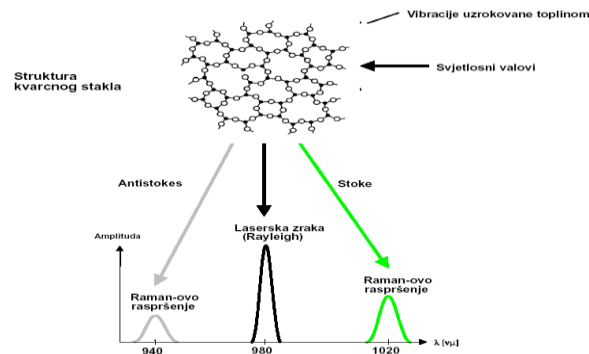
Kvarcno staklo koristilo se kao svjetlovodna nit u senzorskom kabelu. Kvarcno staklo je oblik  $\text{SiO}_2$  (silicijdioksid) s amorfnom čvrstom strukturom. Porast temperature uzrokuje vibracije kristalne rešetke svjetlovodnog kabela. Kada svjetlost padne na termički pobuđenu rešetku, dolazi do interakcije fotona i elektrona. Rezultat ove interakcije je raspršivanje svjetlosti u svjetlovodnom kabelu koji se naziva Ramanovo raspršenje ili Ramanov efekt. Frekvencija raspršene svjetlosti je pomaknuta u odnosu na frekvenciju inicijalnog svjetlosnog snopa iznos rezonantne frekvencije temperaturom pobuđene rešetke. Reflektirana svjetlost iz svjetlovodnog kabela sadrži tri frekvencijski razmaknute komponente :

- **Rayleigh-ova komponenta** valne duljine identične valnoj duljini inicijalnog svjetlosnog snopa
- **Stokes komponenta** s višom valnom duljinom od valne duljine Rayleigh-ove komponente svjetlosnog snopa
- **Antistokes komponenta** s nižom valnom duljinom od valne duljine Rayleigh-ove komponente svjetlosnog snopa

Shematski prikaz 5 prikazuje mjesta u spektru kojima se pojavljuju novonastali Ramanovi valovi. Amplituda Stokes pojasa valova je praktički temperaturno



neovisna, dok je amplituda Antistokes pojasa promjenjiva u ovisnosti o temperaturi. Temperatura na pojedinom mjestu senzorskog kabela određuje se na osnovi omjera amplituda Antistokes i Stokes pojasa.



Shematski prikaz 5 – Nastanak Ramanovih valova [3]

Fizikalna veličina kao što je temperatura ima rešetku kvarcnog stakla (svjetlovoda), tako da lokalno mijenja karakteristiku propagacije svjetla kroz svjetlovod. Budući da je prigušenje svjetla u kvarcnom staklu, uslijed raspršenja svjetla na mjestu vanjskog djelovanja topline, mjerivo, te s obzirom da se mjesto djelovanja topline može odrediti, svjetlovodni kabel je primjenjiv kao linearni senzor temperature.

### 5.1.2. Sustav za detekciju požara "Linear Heat Detector System"

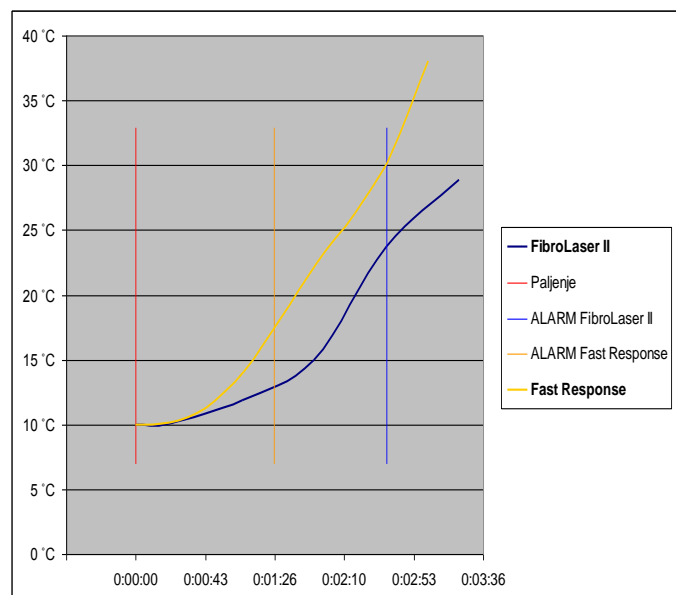
Sustav "Linear Heat Detector System", koristeći moderne tehnologije, poluvodičku diodu visoke efikasnosti za izvor svjetla te algoritme za obradu podataka u mogućnosti je mjeriti opisane pojave u svjetlovodu (Rayleigh-ove i Raman-ove valove) dužine do 4000 m. Optimiranjem ciklusa mjerenja i rezolucije uzduž svjetlovodnog kabela sustav može detektirati promjenu temperature od svega nekoliko stupnjeva u minuti s visokom pouzdanošću.

Parametri bitni za ocjenu pojave požara (kao što su brzine porasta temperature u jedinici vremena, mjerenje maksimalne temperature i slično) podesivi su što omogućuje podizanje učinkovitosti sustava s obzirom na mikroklimatske specifičnosti pojedinih objekata. Parametriranje sustava obavlja se pomoću odgovarajuće aplikacije na kompjuteru spojenim serijskom vezom na kontroler senzorskog kabela. Jednom postavljeni parametri pohranjeni u memoriji kontrolera omogućuju autonoman rad sustava. Kontroler preko bežnaponskih programibilnih kontakata, predprogramirane alarme prenosi ostalim sustavima za signalizaciju i upravljanje.

Sustav "Linear Heat Detector System" idealan je za primjenu u tunelima. Kako je unutar prometne cijevi tunela instaliran samo svjetlovodni senzorski kabel, za vrijeme normalnog rada (dok nema mehaničkih oštećenja senzorskog kabela) nema potrebe za bilo kakvim periodičkim ili aperiodičkim održavanjem na kabeu. Sustav je potpuno imun na teške uvijete u tunelima (vlagu, visoke i niske temperature, prašinu, čađu, agresivne plinove i pare, i slično).

### 5.1.3. Usporedba sustava ugrađenih optičkih kabela

Usporedba brzine odziva dvaju sustava napravljena je na osnovi požarnih proba provedenih u tunelima opremljenim prethodnom generacijom linearnih sustava za detekciju požara "FibroLaser II" i požarnim probama u tunelu "Veliki Gložac", opremljen novom generacijom sustava "Fast Response". U oba slučaja u požarnoj probi korištena je ista smjesa i količina goriva. usporedivi. Grafički prikaz 2 prikazuje odzive sustava, plava krivulja prikazuje odziv sustava „FibroLaser II“, a žuta krivulja „Fast Response“ sustava.



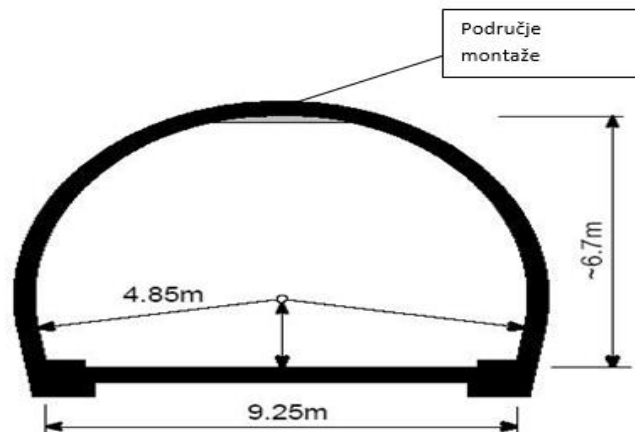
Grafički prikaz 2 – Usporedba odaziva sustava nove generacije „Fast Response“ i sustava prethodne generacije „FibroLaser II“ [3]

Grafički prikaz 2 prikazuje razlike u odzivima sustava te ukazuje na prednost sustava nove generacije („Fast Response“) koji uz gotovo istovjetne uvjete postiže zadovoljavanje kriterija za otprilike polovicu vremena potrebnog za zadovoljavanje kriterija kod prethodne generacije linearnog sustava. Važno je napomenuti kako su i

kriteriji prorade (nadvišenje apsolutne temperature u jednoj točki, porasta temperature u jedinici vremena te nadvišenje prosječne temperature zone u točki) identično postavljeni u oba sustava. Kako nisu mijenjani kriteriji prorade, inicijalno nije narušena osjetljivost sustava na temperaturne promjene uzrokovane promjenom klimatskih uvjeta (dan/noć, ljeto/zima).

#### 5.1.4. Optički detektorski kabel

Senzorski kabel učvršćuje se na svod tunela. S obzirom na geometriju tunela i razvoj topline u slučaju nastanka požara preporučeno je područje unutar kojeg se kabel postavlja. Slika 3 pokazuje karakterističan poprečni presjek tunela i područje unutar kojeg bi senzorski kabel trebao biti instaliran (siva pruga na svodu tunela).



Slika 3 – Područje montaže svjetlovodnih kablova [3]

Kontrolor optičkog kabela (OTS) je uređaj koji zajedno s optičkim detektorskim kabelom čini sustav za detekciju požara. Kontrolor optičkog kabela smješten je u metalni ormar dimenzija 600x600x544 mm u prostoriji trafostanice TS2 – Veliki Gložac. U sklopu ormara nalazi se stabilizirani izvor napona 24 V DC, s uređajem za neprekidno napajanje u propisanom vremenu (30 sati rada u normalnom režimu i ½ sata rada u alarmu). Povezan je sa CDp vatrodajavnom centralom u trafostanici TS 2 tunela Veliki Gložac, koja prikuplja podatke sa svih sustava vatrodajave i prosljeđuje ih dalje prema sustavu daljinske kontrole.

## 6. CENTRALNI VATRODOJAVNI UREĐAJ

Centralni vatrodajavni uređaj je uređaj moderne mikroprocesorske izvedbe, koji služi za prihvatanje, obradu, nadzor i proslijeđivanje signala alarma. Centralni vatrodajavni uređaj omogućava prihvatanje četiri adresabilne petlje, s automatskim i ručnim adresabilnim javljačima požara, te adresabilnim ulaznim modulima za signalizaciju podizanja vatrogasnih aparata.

### 6.1. Centralni vatrodajavni uređaj AlgoRex CI 1145

Centralni vatrodajavni uređaj AlgoRex CI 1145 povezan je sa daljinskom master stanicom koja se nalazi u komunikacijskom ormaru trafostanice tunela Veliki Gložac TS 2. Preko daljinskih stanica i podstanica signali se prenose u centre kontrole prometa COKP Bosiljevo i COKP Delnice. U nastavku slijede tehnički podaci centralnog vatrodajavnog uređaja AlgoRex CI 1145 :

- Broj ulaznih petlji: 4 adresabilne petlje, svaka sa 128 javlača
- Broj kontroliranih izlaza za alarme: 2x24 V DC/0,5 A ili 2x24 V DC/2,0 A
- Broj programabilnih izlaza: 16x24 V DC/40 mA
- Radna temperatura: 0°C - 40°C
- Relativna vlažnost: max 95%, bez kondenzacije
- Napajanje: 230 V, ± 50 Hz
- Potrošnja: max 200 VA
- Rezervno napajanje: do 72 h
- Dimenzije kućišta: 740x436x140 mm
- Dimenzije kućišta: 600x600x544

#### 6.1.1. Povezivanje, način rada i uvjeti za alarmno stanje

Vatrodajavne centrale smještene su u prostorijama UPS-a pripadajućih trafostanica i to CDP1 u trafostanici TS1 (Zapadni portal tunela), a CDP2 u trafostanici TS2 (Istočni portal tunela). Centrala dojava požara CDP1 nadzire zapadne polucije tunela, a centrala CDP2 istočne polucije tunela. Na vatrodajavnu centralu CDP1 priključeni su ručni javljači požara i kontaktni javljači za vatrogasne aparate razmješteni u tunelskim SOS nišama i u ormarićima zapadnih polucije, svaki sa svojom adresom.

Na vatrodojavnu centralu CDP2 priključen je kontroler optičkog detektorskog kabela OTS 4000, ručni javljači požara i kontaktni javljači za vatrogasne aparate razmješteni u tunelskim SOS nišama i u ormarićima istočnih polucijevi, svaki s vlastitom adresom.

Analogno adresabilni optičko-termički javljači požara porazmješteni po stropu prostorija transformatorskih stanica spojeni su na pripadajuću vatrodojavnu centralu s vlastitim adresama. Vatrodojavne centrale povezane su međusobno kabelom 2xJHH 2x2x0,8 mm i opskrbljene potrebnim brojem relejnih izlaza tako da se omogući prosljeđivanje generalnog alarma, signala smetnje te alarma svih zona na sustav daljinskog vođenja. Na centralnom nadzornom sustavu u centru kontrole prometa COKP Bosiljevo također će se aktivirati svjetlosni i zvučni alarm. Alarmni događaj kao i ostali neregularni događaji u sustavu (smetnje, upozorenja, isključenja i predalarm) trajno će biti evidentirani na pisaču kao i u datoteci događaja na računalu u COKP-u. Poništenje alarmnog signala moguće je izvršiti isključivo po izvršenom izviđanju te utvrđivanju i otklanjanju uzroka alarma. To znači da tehničko osoblje na održavanju mora biti fizički prisutno kako bi moglo resetirati uređaj. Da bi se realiziralo brzo i pregledno utvrđivanje mjesta eventualnog požara, optički kabel u tunelskim cijevima podijeljen je (softverski) u sekcije dužine cca 250 m, dakle ukupno u 5 sekcija u svakoj tunelskoj cijevi. Vatrodojavne centrale su programirane tako da se u slučaju požara na LC display-u centrale može očitati alarmna zona kao i ostali relevantni parametri poput vremena nastanka požarnog alarma i slično. Uvjeti za alarmno stanje su :

- Prekoračenje podešene maksimalne temperature
- Prekoračenje podešene promjene(diferencije) temperature u jedinici vremena
- Nadvišenje prosječne temperature zone

Razine podešenih pragova podešeni su na :

1. Zonu unutrašnje tunelske cijevi :
  - Maksimalna proradna temperatura: 58°C
  - Diferencijalna proradna temperatura: 8°C/ min, 10°C/2 min, 14°C/3 min
  - Nadvišenje prosječne temperature zone: 15°C
2. Zonu portala :
  - Maksimalna proradna temperatura: 65

- Diferencijalna proradna temperatura: 10°C/2min, 12°C/2 min, 14°C/3 min
- Nadvišenje prosječne temperature zone: 25°C

## 7. SUSTAV ZA MANUALNU DOJAVU POŽARA U TUNELU

Manualna dojava požara u tunelima može se izvršiti na dva načina:

- Razbijanjem stakla i pritiskom tipke na najbližem ručnom javljaču požara
- Aktiviranjem kontaktnog javljača prilikom podizanja vatrogasnog aparata iz ležišta

### 7.1. Ručni javljači požara

Ručni javljači požara ugrađuju se u pripadajuće analogno adresabilne vatrodojavne sustave. Ručni javljač požara koristi se uglavnom u kombinaciji sa raznim drugim vrstama vatro detektora, a predstavljaju tipkalo koje osoba mora aktivirati ako primijeti požar. Nakon aktivacije javljanjem sustav vatrodojave radi sve ono što bi i radio i da je požar dojavljen od strane detektora požara bilo kojeg drugog automatskog javljača požara. Ručni adresabilni javljači požara smješteni su u prostore SOS niša i na portalima tunela, na visinu cca 1,4 m od poda.



Slika 4 - Ručni javljač požara tipa DM 1133 Siemens-Cerberus [4]

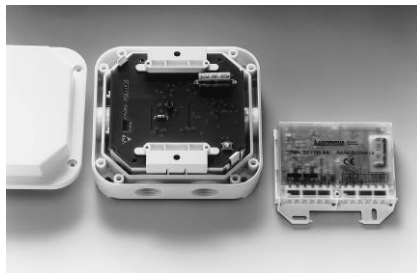
Ručni javljači su izrađeni u zaštiti IP 66 i postavljeni na mjestima zaštićenim od štetnog utjecaja vode i prašine. Na slici 4 je prikazan ručni javljač DM 1133 sa zaštitnim poklopcem DMZ 1197-AD (Siemens-Cerberus) ugrađen u SOS niši tunela. Ovaj ručni javljač požara karakterizira robusna izrada. Nakon uporabe potrebno je zamijeniti zaštitno stakalce i pomoću specijalnog ključa resetirati uređaj. Nakon toga je spreman za ponovnu uporabu.

Tehnički podaci su :

- Područje radnog napona – 16 do 28 V DC
- Spajanje kabelom dimenzije 0,2 do 1,5 mm<sup>2</sup>
- Radna temperatura: -25 do +60 °C
- Vlažnost: do 100%
- Kategorija zaštite: IP 66

## 7.2. Kontaktni javljači vatrogasnih aparata

Kontaktni javljači opskrbljeni su odgovarajućim adresabilnim modulom za prilagodbu na vatrodjavnu petlju (monitor modul). Javljači su opskrbljeni izolatorom petlje za odvajanje dijela petlje u kvaru. Slika 5 prikazuje adresabilni modul DC 1131.



Slika 5 - Adresabilni modul DC 1131 [4]

U svakoj tunelskoj cijevi predviđene su po tri tunelske niše za smještaj razdjelnika govorno-pozivnih uređaja (SOS kabina), dva aparata za početno gašenje požara tipa S-6 i ručnog javljača požara. Slika 6 prikazuje unutrašnjost SOS niše. Osim navedenog, ispred portala tunela, na desnoj strani gledano u smjeru vožnje postavljeni su samostojeći ormarići s po dva aparata za početno gašenje požara S-6, što je prikazano na slici 7.



Slika 6 - SOS niša sa aparatima za gašenje požara, adresabilnim modulom i ručnim javljačem požara [4]

Ormarići su izrađeni od inoxa i imaju dimenzije: visina 600 mm, dubina 250 mm. Donji dio montiranog ormarića s vatrogasnim aparatima je na visini 1,00 m od okolnog terena tako da ručica vatrogasnog aparata ne bude viša od 1,5 m.



Slika 7 - Samostojeći ormarić sa vatrogasnim aparatima i kontaktnim javljačima [4]

U svrhu pravovremene i kvalitetne registracije i signalizacije podizanja vatrogasnih aparata iz ležišta, predviđeni su kontaktni javljači požara (magnetski kontakt) koji su smješteni na nosač svakog vatrogasnog aparata. Prilikom podizanja vatrogasnog aparata iz ležišta doći će do aktiviranja odgovarajućeg kontakta javljača i prosljeđivanja signala alarma na vatrodojavnu centralu, a posredstvom sustava daljinskog vođenja i na centralni kompjutorski sustav u COKP-u.



## 8. AUTOMATSKA DOJAVA POŽARA U TRAFOSTANICAMA

### 8.1. Optičko-termički adresabilni javljači požara

Za detekciju eventualnog požara u nekoj od prostorija transformatorskih stanica primijenjeni su adresabilni optičko-termički javljači požara opskrbljeni izolatorom petlje za odvajanje dijela petlje u kvaru. Na slici 8 prikazani su javljači tipa DOT 1131 proizvođača Siemens-Cerberus.



Slika 8 - Optičko-termički adresabilni javljač požara DOT 1131 [4]

Optičko-termički adresabilni javljači požara učvršćeni su na strop odgovarajuće prostorije, kako je prikazano na slici 8. Spojeni su na odgovarajuću CDP centralu.

### 8.2. Svjetlosni indikatori prorade javljača požara

Za signalizaciju alarma javljača požara iz prostorije trafostanice koriste se svjetlosni indikatori prorade javljača požara tipa DJ 1192 Simens-Cerberus. Jedan takav svjetlosni indikator prikazan je na slici 9.



Slika 9 - Svjetlosni indikator DJ 119 [4]

S obzirom da su optičko-termički adresabilni javljači požara smješteni na strop unutar trafostanice, iznad vrata trafostanice postavljaju se svjetlosni indikatori alarma. Kod pojave alarma svjetlosni indikatori trepću crvenim svjetlom, te na taj način daju vizualnu informaciju o proradi alarma u trafostanici. Svjetlosni indikator DJ 1192 povezan je sa paralelnom vezom sa optičko-termički adresabilnim javljačem požara DOT 1131, što je prikazano na slici 10.



Slika 10 - Indikator prorade javljača iznad vrata trafostanice [4]

Unutar trafostanice se nalazi i monitor na kojem se može vidjeti stanje sustava vatrodjave. Na centralnom nadzornom sustavu za dojavu požara nalazi se prikaz vatrodjavnih zona s pripadajućim prosječnim i maksimalnim temperaturama. Operater u svakom trenutku može vidjeti temperaturu u određenom dijelu, odnosno zoni vatrodjavnog optičkog kabela. [4]

## **9. VENTILACIJSKI SUSTAVI U TUNELIMA**

Ventilacija se u svakodnevnom radu koristi radi smanjenja koncentracije otrovnih plinova te radi održavanja stalne atmosfere u tunelu. Propisanim standardima opisani su ventilatori, mogućnost upravljanja, točan raspored i maksimalni dopušteni nivo zagađivača. Standardi su prihvaćeni u praksi kao takvi. Kriteriji za rad ventilacije u slučaju požara dani su iz stručnih i znanstvenih radova te iz niza normi i propisa. U vjetrenju tunela razlikuje se :

- separatno vjetrenje tijekom izgradnje (probijanje, iskop, izrada) tunela
- vjetrenje tunela tijekom eksploatacije (upotrebe, prema izgradnji)

Vjetrenje tunela tijekom eksploatacije bitno se razlikuje za cestovne tunele u odnosu na željezničke i tunele podzemne željeznice. Obzirom na značaj i raširenost, u daljnjem će se dijelu rada izložiti vjetrenje cestovnih tunela.

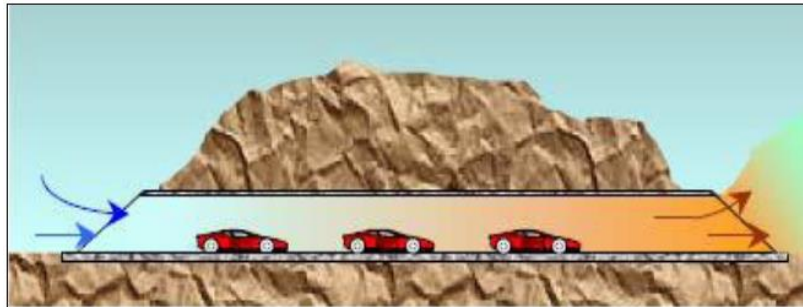
Primarno vjetrenje tunela podrazumijeva razrjeđivanje otrovnih plinova ispod maksimalno dozvoljenih koncentracija. U cestovnom prometu prevladavaju vozila sa benzinskim motorima, stoga je dominantan otrovni plin ugljični monoksid CO. Dizelski motori ispuštaju više dušičnih oksida, pa se zahtijeva intenzivnije zračenje uslijed smanjene vidljivosti. Sekundarno vjetrenje tunela podrazumijeva da se osiguraju povoljni atmosferski uvjeti za boravak te rad ljudi u tunelu (temperatura, vlaga, brzina zraka).

Postoji više vrsta ventilacije tunela, stoga postoje i razne izvedbe ventilacijskih sustava. Ventilacija ovisi i o načinu prometa (jednosmjerni-dvosmjerni), dužini tunela (tuneli do i preko 500 m) te o mogućnosti građevinske izvedbe.

### **9.1. Prirodna ventilacija u tunelu**

Prirodna ventilacija rezultat je meteoroloških uvjeta (temperatura zraka na portalima, razlika tlaka zraka na portalima, vjetar i drugo, a kako to izgleda vidi se na slici 11. Isto tako na ventilaciju mogu djelovati i nadmorska visina, konfiguracija tla i intenzitet

prometa. Ipak prirodna ventilacija je nesigurna i ne može osigurati zaštitu u slučaju požara. [5]



Slika 11 – Prirodno provjetravanje tunela [5]

## 9.2. Uzdužna ventilacija u tunelima

Uzdužna ventilacija je sustav kod kojeg se zrak utiskuje ili isisava iz tunela na ograničenom broju točaka. Tako nastaje uzdužni protok zraka kroz tunel. U slučaju požara, dim se isisava kroz portale kroz cijeli tunel. Uzdužna ventilacija pogodna je za jednosmjerni promet, s malom gustoćom prometa, u slučaju kada su vozila ispred mjesta požara zaštićena uzdužnim strujanjem zraka, pod pretpostavkom da vozila koja se nalaze niz struju od mjesta požara, mogu slobodno pobjeći. Isto tako, uzdužni ventilacijski sustavi, s reverzibilnim ventilatorima imaju dva nedostatka. Prvi nedostatak je da se uzdužni protok ne može zaustaviti sve dok ventilatori rade u bilo kojem smjeru. Drugi nedostatak je nemogućnost zadržavanja dima i pare u bilo kojem prostoru, zbog čega se pomiču prema zarobljenim vozačima. Postavljanje predimenzioniranih ventilatora kod kojih protok zraka može biti obrnut, u slučaju nužde, ne rješava problem uzdužnog protoka, budući da se produkti izgaranja isisavaju kroz otvore namijenjene pred definiranom protoku.

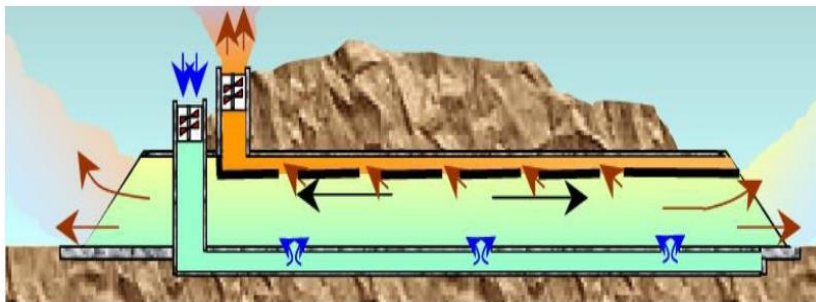


Slika 12 – Uzdužno provjetravanje tunela s ventilatorima na stropu [5]

Zbog svoje jednostavnosti i prihvatljive ekonomske ovisnosti uzdužna ventilacija je najčešći odabir za ventiliranje tunela. Na slici 12 vidljiv je uzdužni sustav provjetravanja s ventilatorima na stropu.

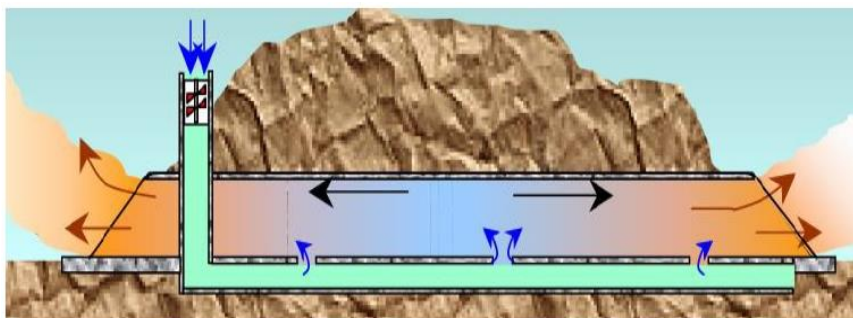
### 9.3. Poprečna i polupoprečna ventilacija u tunelu

Kod poprečne i polu poprečne ventilacije postoji više vrsta različitih izvedbi. Poprečna ventilacija radi tako da ubacuje svježi zrak u slučaju normalnog rada kroz dovodni kanal u podu, a zagađeni zrak se odvodi kroz odvodni kanal u stropu tunela i to se vrši na više usisnih i odsisnih dionica.



Slika 13 – Sustav poprečne ventilacije [5]

Nedostatak poprečne ventilacije dovodi do nemogućnosti izvedbe ukoliko konfiguracija terena to ne dopušta, a isto tako podiže troškove izrade. Slika 13 prikazuje kako izgleda sustav poprečne ventilacije. Upravljačkim jedinicama predviđeno je automatsko uključivanje rada ventilatora radi smanjenja smanjene vidljivosti u tunelu. Kontrola ugljičnog monoksida i smanjenja vidljivosti vrši se na više mjernih mjesta.



Slika 14 – Sustav polupoprečne ventilacije [5]

Podaci se nakon mjerenja prenose do centralnog mjernog uređaja ventilacije, a zatim do komandnog centra, gdje se obavlja automatsko uključivanje i puštanje u pogon pojedine grupe ventilatora. Na slici 14 vidljiv je izgled polupoprečne ventilacije tunela.

#### 9.4. Ventilacija za kontrolu požara i dima

Ventilacija je vrlo važna pri kontroli razvoja požara u tunelu, odnosno pri kretanju i kontroli širenja dima. U slučaju požara u tunelu, sustav za automatsku dojavu požara na temelju dobivenih informacija uključuje požarni režim rada ventilacije. Zahtjev koji dobiva automatski sustav za dojavu požara, ovisno o meteorološkim prilikama i prirodnom strujanju zraka (koje može biti znatno iznad 1,5 m/s koliko je inače predviđeno) može zatražiti zaustavljanje rada ventilatora na vrijeme do 8 minuta. Ukoliko taj scenarij nije moguć, sustav će zahtijevati rad rubnih ventilatora u suprotnom smjeru od prirodnog strujanja zraka da bi se smanjila brzina prirodnog strujanja na navedeni iznos do trenutka kada je evakuacija obavljena.



Slika 15 – Izlazak dima iz tunela [5]

Algoritam upravljanja ventilacijom mora, u slučaju požara, biti unaprijed definiran i softverski obrađen, kako bi se u slučaju požara moglo što brže reagirati. Na slici 15 vidljivo je kako izlazi dim iz tunela prilikom požara.

U požarnom sustavu, zadaća ventilacijskog sustava je, uz strop tunela, u prvoj fazi gašenja, odnosno provođenje odgovarajuće evakuacije osoba, uspostaviti stratifikaciju dima. U tunelima se ugrađuje sustav uzdužne reverzibilne ventilacije s impulsnim, aksijalnim ventilatorima, ekvidistantno smještenih u grupi po dva u vrhu tunela. Ovisno o njihovoj dužini u tunele se ugrađuje potreban broj ventilatora koji osigurava u svim prometnim i vremenskim uvjetima nisku koncentraciju ugljičnog monoksida, dobru vidljivost te požarni režim rada ventilatora. Ugrađeni ventilatori su reverzibilni, te se pomoću njih u tunelu može mijenjati strujanje zraka prema jednom

od portala. što ovisi o trenutnim meteorološkim prilikama ili u slučaju požara, o mjestu nastanka požara. Impulsni ventilatori projektirani su za rad pri povišenoj temperaturi od 250 °C, u vremenu od 90 minuta, koju proizvođač dokazuje odgovarajućim certifikatom koji je priznat od nadležne ustanove. Uz ventilatore sustav obuhvaća i upravljački sklop za pokretanje ventilatora, senzorske sklopove za mjerenje koncentracije ugljičnog monoksida, senzore za mjerenje vidljivosti, uređaje za mjerenje smjera i brzine strujanja zraka u tunelu. Kabeli kojima se vrši napajanje ventilatora moraju biti otporni na požar od F-90 prema RVS smjernicama.

Razdjelnici kojim se obavlja upravljanje ventilatora moraju izdržati temperature od 250°C u trajanju od 90 minuta i biti ispitani prema HRN N.K5.503 normama. Kabeli za mjerenje i upravljanje ventilatorima koji su položeni izvan kabelskog kanala u tunelu moraju imati teško gorivu i ne halogenu izolaciju. Prema rezultatima dostupnih studija, eksperimentalnih istraživanja i recentnih ispitivanja može se zaključiti kako ventilacijski sustav može biti vrlo važan činilac kod požara, ako je konstrukcija izvedena da se maksimalno može iskoristiti. U studijama su istaknute mjere koje su prikladne za rad u slučaju požara :

- Uzdužni protok mora biti brzo zaustavljen ako se detektira požar.
- Održavanje granice između dima i zraka je neophodna radi preživljavanja osoba koje su ostale zarobljene u automobilima ispod dimnog sloja. Bilo koji dovod zraka koji nije ispod ili na razini vozila, prouzročiti će turbulenciju u prostoru i tako poništiti sve mjere održavanja dimnog sloja iznad čistog zraka. Dok će dovod zraka ispod ili iznad razine vozila u potpunosti iskoristiti toplinsku energiju požara i neće doći do nakupljanja dima u nivou prometnice.
- Dijelovi sustava za ekstrakciju moraju biti sposobni raditi određeno vrijeme pri temperaturi izgaranja preko 250°C.
- Da bi se uspostavili gornji uvjeti, upravljanje i usmjerivači moraju imati dovoljnu fleksibilnost pouzdanost i brzinu.
- Sustavi za dojavu požara moraju imati zadovoljavajuću osjetljivost da bi se omogućilo onome tko upravlja da prihvati i odredi mjesto požara i tako omogućiti što bržu intervenciju u slučaju požara.

Ventilacijski sustav koji je napravljen na gore opisan način izvući će toplinu i dim s požarišta, time smanjujući opasnu zonu na prostor između požara i točke ekstrakcije. To će područje biti ispunjeno dimom, no pravilnim odabirom točaka ekstrakcije, omogućit će vozačima evakuaciju, a vatrogascima pristup požarištu i suzbijanje požara.

#### **9.5. Karakteristični požar za projektiranje ventilacije i otpornost konstrukcije tunela**

Projektiranje ventilacije se temelji na količini toplinske energije koja se oslobađa u požaru ili brzini širenja dima. Projektiranje konstrukcije tunela, u odnosu na otpornost prema požaru, ovisi o porastu temperature zraka u određenom vremenskom periodu. Prema eksperimentima koji su dosad izvedeni najveća temperatura ispod stropa tunela ovisi o vrsti prometnih sredstava i varira od 400°C za osobni automobil, do 1200°C za auto cisternu sa benzinom. Nakon prvih 10 minuta temperatura se ubrzo povećava na 1200°C. Za zaštitu vanjske tunelske obloge koriste se materijali koji zadovoljavaju tražene uvjete u određenom vremenskom periodu uz odabranu karakterističnu krivulju požara. U to se ubrajaju unutarnja betonska obloga određene debljine, protupožarna žbuka, silikatne ploče i slično. [5]



## 10. POŽARI U TUNELIMA

Tunel je podzemni prolaz prokopan kroz brdo, ispod rijeke ili mora, koji služi za prometnice ili u hidrotehničke svrhe. S požarnog motrišta pozornost privlače tuneli za cestovni i željeznički promet. Prema graditeljskim osobinama tuneli mogu biti nisko ležeći (spajaju dvije doline prilično iste nadmorske visine), visoko ležeći kratki vododijelni, tuneli s usponima s obje strane i prijelomom nivelete u sredini tunela i nisko ležeći dugi vododijelni, tuneli s jednim nagibom.

Oblik i dimenzija zidane obloge ovise o slobodnom profilu i o brdskom potisku, a ovaj o geološkom sastavu brda. Tuneli su skupe građevine i iziskuju posebne mjere zaštite. U povijesti tunelske gradnje, prve naznake tunelskih karakteristika, pojavljuju se u grobnicama Egipćana, 2000 godina prije Krista, te Numbijskim pećinama. U Jeruzalemu je 1000 godina prije Krista izgrađen 537 m dugačak tunel za vodovod. Poznat je i tunel dužine 1000 metara i na otoku Samosu, u 7 stoljeću prije Krista. Prvi poznati cestovni tunel izgrađen je u Italiji, u Napulju, 36 godine prije Krista, dužine 1000 metara. Prvi željeznički tunel izgrađen je u Engleskoj, 1830. godine, čija je izgradnja trajala 4 godine. Najduži jednotračni željeznički tunel na svijetu izgrađen je 1906. godine u Švicarskoj, dužine 19 803m, a dvotračni u Italiji 1934. godine, dužine 18 510 m. Najduži tunel za cestovni promet je onaj ispod Mont Blanca, izgrađen 1967. godine dugačak 11 600 m.

Požari u tunelu zahtijevaju specijalnu taktiku gašenja, jer su praćeni nizom specifičnih pojava, opasnosti i nepredvidljivih situacija. U požarima često stradavaju ljudi, što nalaže kombiniranu akciju, odnosno aktivnu lokalizaciju i spašavanje ljudstva. U tome gasitelji nailaze na prepreke, iznenađenja, potencijalne opasnosti, poglavito u pogledu topline koja ne dozvoljava i onemogućava pristup žarištu, konkretno zapaljenim automobilima. Gasitelji su izloženi osim plinovitim i agresivnim produktima gorenja i opasnostima od posljedice toplinskog djelovanja na građevnu konstrukciju,

pri čemu može doći do urušavanja i opadanja obrade unutrašnjosti, a moguća su i urušavanja samog tunela. Nisu isključive i kancerogene opasnosti od raznih materijala, poglavito onih primijenjenih za izolaciju. Akcija gašenja takvih požara je ograničena, odvija se u zatvorenom prostoru, bez slobodnih i dostupnih komunikacija potrebnim vatrogascima. Slaba je vidljivost ili je uopće nema jer je rasvjeta nepouzdana, a osvijetljene teško izvedivo.

### **10.1. Uvjeti ventilacije i izgaranja u tunelima**

Tunel je cijev otvorena s dvije strane koja načelno ima prirodnu ventilaciju ili vlastiti sustav prisilne ventilacije. U normalnom radu, svrha ventilacijskog sustava je da postojeći zrak u cijevi zagađen ispušnim plinovima vozila nadomjesti svježim zrakom. Osim prirodne i prisilne ventilacije, na gibanje zraka u tunelu utječe i „stapni efekt“, što je posljedica gibanja vozila. Da bi u slučaju nezgode bilo moguće hitro reagirati, uzdužna ventilacija u tunelu pri redovitom radu treba održavati minimalnu brzinu zraka od 1 m/s, dok polupoprečna i poprečna ventilacija trebaju funkcionirati tako da osiguraju najmanje 4 izmjene zraka na sat. Ipak, u tunelima u redovitom radu česte su i veće brzine gibanja zraka, od 7-8 m/s.

U slučaju požara, potrebno je koristiti brzine koje su barem jednake kritičnima (2,3-3,6 m/s), što je dovoljno da ne nastupi backlayering. Protok zraka kroz tunel pruža trajni izvor kisika za izgaranje u slučaju požara. Količina zraka koja stoji na raspolaganju za oksidaciju u nekom presjeku tunela ovisi o površini poprečnog presjeka tunela i o brzini strujanja, čime je određena i količina toplinske energije koja se može osloboditi. Stoga je temeljem masenog protoka atmosferskog kisika za svaku poziciju u tunelu moguće izračunati maksimalnu toplinsku snagu požara ( $HRR_{max}$ ). Pri potpunom izgaranju najčešćih organskih tvari, najčešće se računa da se prema svakom kilogramu potrošenog kisika pri čemu se oslobađa energija. Na bazi potpunog utroška raspoloživog kisika, može se vidjeti da li pri normalnim operativnim uvjetima u tunelu ima dovoljno kisika u svim presjecima. Do sada izmjerene  $HRR$  u tunelima ukazuju da je izgaranje bilo nepotpuno u vrlo rijetkim slučajevima, kad je požarno opterećenje bilo preveliko.

Uvrštavanjem nekoliko karakterističnih površina poprečnog presjeka tunela i brzina strujanja zraka u gornju jednadžbu, mogu se dobiti indikativne toplinske snage

požara (HRR). Brzina strujanja od 1 m/s prikladna je za prikaz, jer se iz nje za svaku veću ili manju brzinu lako može odrediti odgovarajuća HRR množenjem s faktorom proporcionalnosti, dok je brzina od 2,6 m/s brzina pri kojoj se tipično onemogućava „backlayering“.

Tablica 2 - Izgorjela količina goriva f m& (kg/min) za neke HRR

<b>Gorivo</b>	<b>50 MW</b>	<b>100 MW</b>	<b>200 MW</b>	<b>400MW</b>
Benzin	76,3	152,5	305,1	610,0
Polietilen	77,0	154,0	308,0	616,0
Drvo	200,8	401,6	803,2	1606,4

Poprečni presjek od 10 m<sup>2</sup> je prikladan za množenje s faktorom proporcionalnosti. Za orijentaciju se navodi da većina postojećih tunela u RH ima poprečni presjek između 50 i 60 m<sup>2</sup>, a novi tuneli često imaju presjek od oko 80 m<sup>2</sup>. U tablici 2 dane su vrijednosti za slučaj idealnog stehiometrijskog izgaranja, kao i za slučaj da je efikasnost izgaranja (stupanj iskorištenja kisika)  $\eta = 75\%$ , odnosno da je pretičak zraka  $\lambda = 1,33$ .

U stvarnom požaru tekućeg i krutog goriva, imajući u vidu da na raspolaganju stoji dovoljna količina kisika, HRR će biti određena distribucijom goriva u prostoru, ali i toplinskim zračenjem plamena i okolnih ugrižanih površina natrag na kondenziranu fazu. Proces izgaranja biti će određen vrstom goriva i brzinom oksidacije goriva, što znači da HRR signifikantno ovisi o vrsti goriva. Ako je poznato gorivo, bitan faktor toplinske snage izgaranja postaje odavanje para, što ovisi o veličini površine kondenzirane faze goriva koja je izložena toplinskom zračenju plamena i okolnih površina. Kod tekućeg goriva, površina goriva u kontaktu sa zrakom u pravilu je horizontalna (lokva), dok je kod trodimenzionalne kondenzirane faze površina reakcije određena površinom oplošja. Masa prisutnog goriva određuje pak ukupnu energiju koja se izgaranjem može osloboditi. Rezultati mnogobrojnih ispitivanja za različite materijale daju brzine regresije goriva u kg/m<sup>2</sup>min, u što su uključene brzine pirolize i izgaranja, pa je poznavanjem toplinske snage požara moguće približno odrediti površinu izgaranja. Ova pretpostavka naravno važi uz uvjet da poznato gorivo tijekom čitavog vremena izgara u približno jednakim uvjetima.

## 10.2. Razvoj, prijenos i širenje požara u tunelima

Općenito je prihvaćena tvrdnja da je u ranim fazama tunelskih požara uvijek na raspolaganju dovoljna količina kisika. To znači da se prisutno gorivo u reakciji

izgaranja gotovo u cijelosti transformira u plinovitu fazu, da se oslobađa cjelokupna raspoloživa toplinska energija i da maksimalne temperature izgaranja nastaju u zoni izgaranja.<sup>117</sup> Budući da je udaljenost između stropa tunela i goruće tvari relativno mala, plamenovi u središtu požara vrlo brzo dosižu do stropa. Toplinska energija tada prelazi na građevinu ili se putem dimnih plinova transportira u smjeru toka zraka. I energija prenesena na strop i energija vrućih plinova uzrokuju toplinsko zračenje natrag na goruću tvar, što ubrzava zagrijavanje kondenzirane faze i pridonosi bržem razvoju požara.

Pojava ubrzanog razvoja dobro ventiliranih požara u malim zatvorenim prostorima poznata je i u teoriji i u vatrogastvu. Brzina izgaranja ovdje nije upitna jer na raspolaganju ima dovoljno kisika, ali je važno odrediti brzinu pirolize, jer ona određuje maseni protok plinovite faze iz kondenzirane faze u zonu izgaranja. Kao što je već istaknuto, ovaj maseni protok bitno ovisi o toplinskom zračenju plamenova i ploha koje okružuju gorivu tvar. Za opisivanje izgaranja različitih goriva u zatvorenim prostorima već niz godina postoje standardne temperaturne krivulje koje određuju ovisnost temperature o vremenu izgaranja dobivene na temelju ispitivanja reprezentativnih goriva, a oblik krivulja ovisi o gorivu i okolišu u kojem ono izgara. Načelno, razvoj požara u zatvorenom prostoru može se podijeliti na :

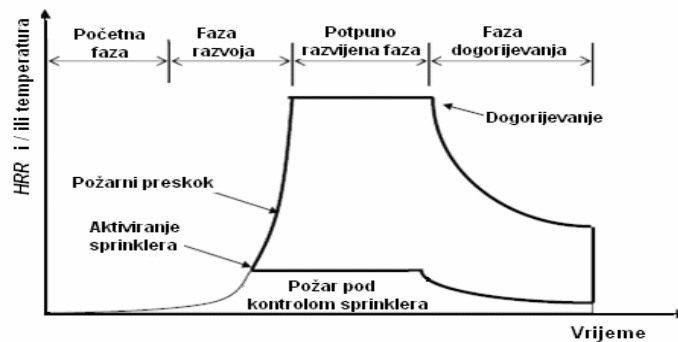
- Inicijalnu fazu – koja bitno ovisi o vrsti goriva, njegovom obliku i rasporedu masa, a požar započinje ili tinjanjem ili izgaranjem plamenom.
- Fazu razvoja – koja obuhvaća širenje gorenja do nastupa razvijenog požara.
- Potpuno razvijenu fazu – čija značajka je približno konstantna brzina izgaranja i toplinska snaga požara (pri potpunom i nepotpunom izgaranju požara).
- Fazu dogorijevanja – koja obuhvaća period opadajuće žestine požara.
- Fazu gašenja – kada prestaje oslobađanje topline zbog nestanka goriva.

Vremenski tijek *HRR* pri zaštiti tunela od požara može se prema Ingason opisati na više načina i to kao :

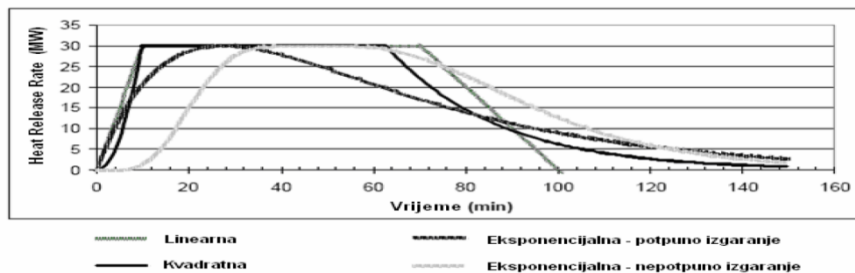
- **Linearni rast** : Francuske preporuke za požarnu ventilaciju tunela daju linearni rast požara u periodu 0 do  $t_{max}$ , zatim konstantnu maksimalnu *HRR* do trenutka  $tD$  te linearni pad od maksimalne vrijednosti do nule.
- **Kvadratni rast** : Za požare različitih vrsta vozila, Ingason je predložio kvadratni rast krivulje požara (*HRR*) od trenutka 0 do  $t_{max}$ , konstantnu

maksimalnu  $HRR$  do trenutka  $tD$  i eksponencijalni pad  $HRR$  od maksimalne vrijednosti do nule u beskonačnom vremenu.

- **Eksponencijalni rast – nepotpuno izgaranje** : Ingason je predložio aproksimaciju krivulje  $HRR$  u vidu jedinstvene eksponencijalne vremenske funkcije (umjesto 3 funkcije), počevši od trenutka početka razvoja požara pa do potpunog dogorijevanja. Ovaj pristup je primjenjiv jedino za nepotpuno izgaranje.
- **Eksponencijalni rast – potpuno izgaranje** : Ingason je razvio krivulju požara s konstantnim središnjim periodom zbrajajući dvije eksponencijalne krivulje s primjenom samo za nedvojbeno potpuno izgaranje. [6]

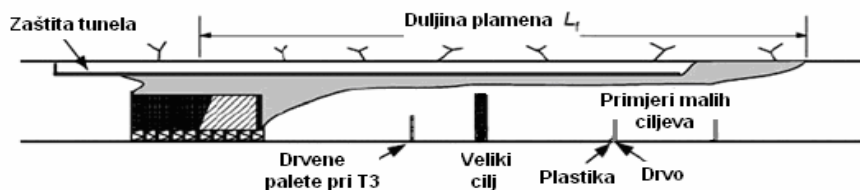


Shematski prikaz 6 – Faze razvoja požara [6]



Grafički prikaz 3 - Prikaz krivulja za aproksimaciju promjene HRR s protekom vremena [6]

Do sada je bio razmatran jedino razvoj požara na homogenoj strukturi i obliku gorive tvari, što odgovara razvoju požara po površini i strukturi vozila, njegovog tereta ili oslobođenog tereta (npr. lokva gorive tekućine).



Slika 16 - Razmještaj goriva i ciljnih objekata u testu prijenosa požara u tunelu. [6]

Ako se u tunelu tijekom požara zatekne više stacionarnih vozila, rizik prijenosa požara s vozila na vozilo postaje realna mogućnost. Slika 16 prikazuje razmještaj goriva i ciljnih objekata u testu prijenosa požara u tunelu.

### 10.3. Utjecaj različitih načina ventilacije

Ventilacija tunela pri današnjem je stanju tehnike vjerojatno najvažniji način aktivnog utjecanja na efekte opasnih događaja koji se odnosi na cjelokupnu građevinu, a dinamika i količina proizvedenog dima najvažniji je parametar za projektiranje požarne ventilacije. Kako je ranije u tekstu već rečeno, ventilacija tunela može biti prirodna, bez uporabe ventilatora, ili prisilna (mehanička), s uporabom ventilatora. Vozila koja se gibaju induciraju strujanje zraka u smjeru vlastitog gibanja, a stojeća vozila i vozila koja se gibaju u suprotnom smjeru, kočće takvo strujanje. Razlika tlakova zraka između oba portala (ulaznog i izlaznog) pospješuje ili koči strujanje. Faktori koji određuju vremenski promjenjivu brzinu zraka u tunelu su :

- razlika tlakova zraka između dvaju portala (meteorološki uvjeti),
- broj i smjer vožnje gibajućih vozila u tunelu,
- broj stojećih vozila u tunelu,
- aerodinamičke karakteristike vozila,
- struktura prometa (udio različitih vrsta vozila),
- geometrijski parametri tunela (duljina, hrapavost stjenki, itd.)
- potisna sila ventilatora u uzdužnom smjeru.

Uz nepromjenjive ostale faktore, djelovanje prirodne ventilacije bazira se prvenstveno na tzv. stapnom efektu gibanja vozila kroz tunel, čime se inducira strujanje zraka u smjeru gibanja vozila, a u posebnim slučajevima i na povoljnim meteorološkim uvjetima koji omogućavaju prirodnu ventilaciju tijekom znatnog dijela vremena rada tunela. U slučaju jednosmjernog prometa, prirodna ventilacija može biti vrlo

učinkovita i jeftina metoda smanjivanja koncentracije štetnih sastojaka ispušnih plinova vozila u zraku tunela. Imajući u vidu sve strože propise o sadržaju zagađivača u ispušnim plinovima motornih vozila kao i smanjivanje specifične potrošnje goriva, može se očekivati da će se potrebe za mehaničkom ventilacijom tunela u redovnom pogonu u budućnosti smanjivati i time proširiti vremenski period korištenja prirodne ventilacije. Ipak, pri nepovoljnim meteorološkim i prometnim uvjetima, biti će potrebno uključiti u rad prisilnu ventilaciju, što je izvedivo uz prikladan sustav upravljanja.

Sustavi mehaničke ventilacije mogu biti uzdužni, poprečni, polupoprečni i kombinirani o čemu je bilo riječi ranije u tekstu rada. Sustav ventilacije najveći je potrošač električne energije pri eksploataciji cestovnog tunela, pa je korištenje prirodne ventilacije u zajednici s promjenjivim protokom zraka vjerojatno najekonomičnija varijanta u normalnom radu. U slučaju požara, sustav ventilacije u pravilu se prebacuje na „požarni režim“, kojim se nastoje stvoriti što bolji uvjeti za preživljavanje osoba u tunelu i za smanjivanje šteta od požara. Kao što je već spomenuto, u slučaju požara ventilacija se podešava tako da se postigne potpuno izgaranje kondenzirane faze gorive tvari u tunelu. To dalje znači da će u zoni izgaranja prevladavati optimalni uvjeti gorenja i da će temperature na mjestu požara tijekom faze razvijenog požara doseći temperature više od 1000 C°. Rezultat će biti gotovo potpuno izgaranje i niska toksičnost dima, tj. koncentracija CO biti će slična njegovoj koncentraciji pri požarima na otvorenom prostoru. Osnovni ciljevi ventilacije su :

- stvoriti kontrolirano usmjereno strujanje i zona bez dima na uzvjetrenoj strani od žarišta (brzina zraka viša od kritične)
- odvođenje vrućih dimnih plinova iz građevine, zbog smanjenja oštećenje stjenki i opreme uzrokovanog zagrijavanjem
- omogućiti evakuaciju ljudi iz tunela
- olakšati gašenje požara vatrogascima.

Zbog strujanja svježeg zraka u fazi razvoja požara, dolazi do hlađenja dimnih plinova koji se miješaju sa zrakom, a posljedica je smanjenje ili gubitak vidljivosti u mješavini dimnih plinova i zraka, što može negativno djelovati na ljude u tunelu. Stoga se režim požarne ventilacije normalno uključuje tek nakon određenog perioda zadržke, da bi se ljudima na nizvjetrenoj strani omogućilo sigurnije samospašavanje.

## 11. GAŠENJE POŽARA U TUNELIMA

U požarima u tunelima često stradavaju ljudi, što nalaže aktivnu lokalizaciju i spašavanje ljudstva. Požari u tunelima zahtijeva posebnu taktiku i sposobnosti gasitelja koji pritom nailaze na brojne potencijalne opasnosti, poglavito u pogledu topline koja ne dozvoljava i onemogućava pristup žarištu, konkretno zapaljenim automobilima. Tok radijacijske topline požara određen je temperaturom i emisijskim svojstvima sloja vrućih plinova (plamena ili okoline), što je ovisno o reakciji izgaranja. Stvarna kemijska reakcija oksidacije gorive tvari kisikom ograničena je na relativno mali volumen u kojem je omjer koncentracija obiju komponenti u približno stehiometrijskom odnosu, pa je brzina reakcije maksimalna. Prijelaz topline unutar sloja plina i prijelaz te topline na okoliš su vrlo brzi, a temperaturu amorfne mase dimnih plinova moguće je izmjeriti standardnim termoparovima. Zbog snažnog uzgona i turbulencije uzrokovane visokom temperaturom plinova, izmjerene temperature su približno jednake u svim elementima prostora. Nastali svjetleći plamen nije homogen u smislu sastava niti u smislu energijske razine. Ako je debljina plamena dovoljno velika, što je u požaru normalan slučaj, izračeni toplinski tok približno odgovara zračenju crnog, odnosno sivog tijela. Gasitelji su izloženi plinovitim i agresivnim produktima gorenja i opasnostima od posljedice toplinskog djelovanja na građevnu konstrukciju, stoga je moguće urušavanje te opadanje obrade unutrašnjosti i urušavanje tunela. Akcija gašenja takvih požara je ograničena, odvija se u zatvorenom prostoru, bez slobodnih i dostupnih komunikacija potrebnim vatrogascima. Dodatni je problem nedostatna vidljivost te nepouzdana rasvjeta.



## **11.1. Sustavi za gašenje požara u tunelima**

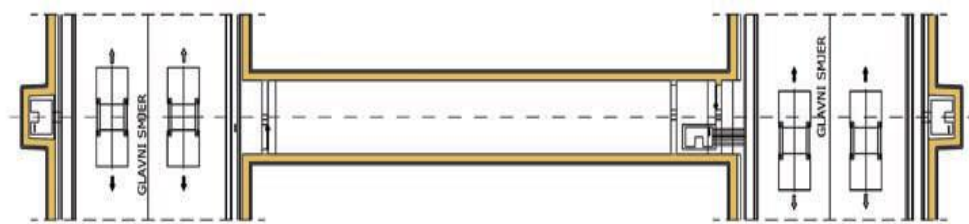
### **11.1.1. Hidrantska mreža**

Cjevovod se postavlja u donji dio bankine tunela, a spojen je u prsten jedna i druga tunelske cijev. Tuneli su dužine od 500 do 1 000m, pa tuneli duži od 1 000m u skladu sa Direktivom Europske unije pripadaju pod mokru hidrantsku mrežu, tlak u hidrantskoj mreži od 6 bara do najviše 12 bara. Kapacitet hidrantske mreže mora omogućiti uzimanje vode u količini od 1 200 l/min u vremenu od 1 sata. Ukoliko nije moguć priključak na lokalnu vodovodnu mrežu treba predvidjeti postavljanje vertikalnih rezervoara kapaciteta od 80 m<sup>3</sup>. Smanjenje nivoa vode u rezervoaru ispod potrebne količine treba se signalizirati u kontrolnoj prostoriji, a nakon svakog pražnjenja rezervoara mora se omogućiti njegovo punjenje u roku od 24 sata. Nadzemni hidranti nalaze se kod svakog ulaza, u blizini portala tunela, s desne strane portala. U tunelu nadzemni hidrant u ormaru s opremom mora biti postavljen na udaljenosti od najviše 120 m te u zaustavnoj niši.

U ormaru pored opreme trebaju biti dodatna 2 vatrogasna aparata od 9 kg sredstva za gašenje. Mjesto gdje su postavljeni vatrogasni aparati posebno je označeno u tunelu svjetlećim znakom. Tunel treba opskrbiti sa 2 vatrogasna aparata u svakoj SOS niši, sa 2 vatrogasna aparata na portalu kod TPS-a te sa 2 vatrogasna aparata ispred ulaza u tunel. Grijani cjevovod i hidrantski ormari postavljaju se na udaljenosti od 600 do 700 m od portala koji se automatski uključuju. Mjerenje temperature hidrantske mreže treba provoditi kontinuirano, a ono se zatim prosljeđuje COKP-u, kao i mjerenje tlaka na portalu i na najvišoj koti tunela. Pume za nadopunu vode u spremnike moraju imati rezervni izvor napajanja i kontrolirane iz COKP-e. Kod prijevoza opasnih tvari u hidrantske ormari ugrađuje se rezervoar s pjenilom i mlaznicom za pjenu. [7]

### **11.2. Sustav za evakuaciju osoba iz tunela**

U tunelu se nalazi nogostup s jedne i druge strane tunelske cijevi namijenjen za hod pješaka širine je oko 85 cm i izdignut 15 cm od kolnika. Ulaz u prostor pješačkog prolaza za ulazak u drugu tunelsku cijev vrši se kroz vatrootporna vrata označena F90.



Slika 17 – Evakuacijski prolaz [7]

Evakuacijska crta na oblozi tunela ucrtana je cijelom dužinom tunela na strani na kojoj se nalaze ulazi u pješačke prolaze i prolaze za vozila. Crta je širine 50 cm u crvenoj boji i označava se na visini od 90 cm od donjeg ruba crte do razine pješačkog nogostupa (bankine). Oznake u slučaju opasnosti označavaju se s unutarnjom rasvjetom koja cijelo vrijeme svijetli. Ploče se postavljaju na bočne zidove neposredno kod vrata izlaza za slučaj opasnosti na visinu najmanje 2 m iznad visine pješačkog nogostupa (bankine).



Slika 18 – Oznaka izlaza u slučaju nužde [8]

Oznaka dva najbliža izlaza u slučaju opasnosti postavlja se na bočnim zidovima tunelske cijevi na međusobnim udaljenostima od najviše 25m, na bočnom zidu tunelske cijevi na strani izlaza na udaljenosti od najviše 50m s unutarnjom rasvjetom. Ploče se na bočne zidove tunelske cijevi postavljaju na istim pozicijama. Kad je udaljenost postavljenih znakova s unutarnjom rasvjetom veća od 25m, između dva takva znaka postavlja se znak izveden fotolumiscentnom folijom, koja emitira svjetlost u mraku, najmanje 3 sata nakon nestanka rasvjete.

### 11.3. Sustav ozvučenja tunela

Tuneli duži od 1.000 m moraju imati ugrađen sustav ozvučenja. Zvučnici se postavljaju na mjestima gdje korisnici tunela čekaju evakuaciju. Operater iz COKP-e obavještava i usmjerava osobe u tunelu u smjeru evakuacije. Vatrogasac iz tunela može davati upute preko podcentrale razglasnog sustava koja se nalazi u prostoru

SOS kabine. Emitiraju se automatske govorne poruke na engleskom, njemačkom i hrvatskom jeziku nakon akcidenta i to :

- napustite vozila i uputite se u evakuacijski prolaz
- slijedite oznake za evakuaciju;
- prometna nezgoda – ugasi motor automobila
- čekajte daljnje upute
- koncentracija ugljičnog monoksida povećana
- ugasi ventilaciju u automobilu.

#### **11.4. Sustav radio komunikacije u tunelima**

Sustav radio komunikacije u tunelima mora omogućiti :

- Prijem jednog ili dva nacionalna radijska programa HR1 i/ili HR2
- Isključenje radijskog programa te emitiranje poruka operatera iz COKP-e preko radijskih prijemnika u autu
- Prije portala mora se postaviti znak koji ukazuje na radijski program i frekvenciju na kom se emitira u tunelu
- Komunikaciju hitnih službi međusobno i prema COKP-i i to vatrogasaca na vatrogasnim frekvencijama, hitne medicinske pomoći, policije na svojim frekvencijama te službe održavanja tunela.

#### **11.5. Sustav neprekidne opskrbe električnom energijom u tunelima**

Sustav besprekidnog napajanja mora zadovoljiti :

- prostoriju u kojoj su smještene AKU baterije i statički pretvarač (UPS) vatrootporno odvojena od ostalih dijelova tunelske cijevi F90 ili TS-a F90
- autonomiju napajanja potrošača je 120 minuta
- prebacivanje na UPS mora se izvršiti u prvoj poluperiodi sinusoidalnog napona
- kontinuirano napajanje iz električne mreže (punjenje AKU baterija) iz dvije TS (susjedne), zbog održavanja TS-a
- kvar na električnoj mreži te kvar zbog požara ne smije utjecati na sigurnosne strujne krugove

Iz sustava neprekidne opskrbe električnom energijom se opskrbljuje :

- rasvjeta tunelskih elektro niša;
- rasvjeta u evakuacijskim znakovima;
- rasvjeta pješački prolazi;
- mjerni uređaji ventilacije;
- sigurnosna rasvjeta tunela (svaka treća u režimu RE1);
- svjetleći SOS uređaji i SOS razdjelnici (niše);
- promjenjivi prometni znakovi;
- upravljački i sigurnosni uređaji prometne signalizacije,
- rasvjete te sustav daljinskog vođenja;
- vatrodojavni sustav.

### **11.6. Vatrogasne akcije i taktički nastup u tunelu**

Imajući na umu vrstu i količinu gorive tvari, uvjete i produkte izgaranja, mogućnosti razvoja akcije i prateće opasnosti, izbor sredstva za gašenje požara u tunelu ne predstavlja poteškoće za gasitelje. Požar se može gasiti vodom, prahom, pjenom, što uvjetuje zatečeno stanje razvoja požara, a poglavito toplina koja vlada u tunelu. Požari su u pravom smislu riječi specifični. Primjerice, ako jaki mlaz vode može na otvorenom prostoru uspješno pogasiti automobilske gume, taktičar zna da to ne može primijeniti u tunelu zbog visoke temperature na kojoj mu sredstvo za gašenje "doživi" termičku desocijaciju. Ako se uspije približiti prahom, unatoč dobrih učinaka, nema oduzimanja topline. U međuvremenu požar ne čeka, već bukti, plamti, razvijaju se plameni jezici i naglo se akumulira toplina. No nažalost, često puta su gasitelji "naoružani" sa sredstvima za gašenje, čekaju ispred ulaza u tunel, jer im opisana osobitost takvih požara naprosto ne dopušta približavanje mjestu požara.

Načelo nove taktike i taktičke primjene sredstava za gašenje požara je uporaba malih količina sredstva s velikim učinkom uspješnosti gašenja. Za to načelo uspješnosti gašenja potrebna je pravovremena detekcija požara i sprječavanje gašenja požara pomoću najnovijih tehnoloških dostignuća. Kod tunela klasično sprječavanje širenja vatre na susjedne objekte ne postoji, ali se mora omogućiti sprječavanje širenja požara unutar tunela, u konkretnom slučaju na vozila koja su se zatekla u tunelu. Ta mjera se osigurava gradnjom okretišta kod tunela s dvosmjernim prometom ili prolaze u drugu tunelsku cijev kod jednosmjernog prometa u tunelu te odgovarajućom ventilacijom kojom se vrući dim i sagorjele čestice usmjeravaju u

smjeru gdje nema ili ima malo vozila. Okretišta se u pravilu grade kod tunela čija je dužina veća od 2000m, dok se razmak između okretišta kreće od 1000 do 1500m, što ovisi o konfiguraciji terena dok ona može biti i manja odnosno veća, što ovisi o cjelokupnoj koncepciji zaštite od požara tunela pogotovo o požarnom sektoriranju tunela. Okretišta i prolazi u susjednu tunelsku cijev moraju imati poprečne dimenzije tunela te bočne radijuse koji omogućuju prolazak i teretnih vozila bez dodatnih manevara poput vožnje unatrag i slično. Da bi gasitelji mogli doći do mjesta požara mora im se osigurati siguran pristup vatrogasne tehnike i ljudstva do požara odgovarajućim površinama te uz poduzimanje drugih sigurnosnih zahtjeva u pogledu širenja vatre i dima kroz tunel. Površine za pristup vatrogasne tehnike su vatrogasni pristupi, prilazi i površine za operativni rad vatrogasnih vozila. Minimalna površina vatrogasnog prilaza je 3 m kojim standardna vatrogasna vozila mogu doći do požara. Dozvoljava se da širina vatrogasnog prilaza bude i manja ako za prilaz požarištu postoje posebno konstruirana vatrogasna vozila (vatrogasni motorkotač) koja svojim dimenzijama mogu proći kroz takvu širinu. Da bi gasitelji u tunelu mogli započeti gasiti požar potrebno je da se prethodno obavi evakuacija osoba i vozila iz onog smjera iz kojeg će doći vatrogasna tehnika te da se kontroliranom ventilacijom usmjeri dim i toplina u smjeru suprotnom od dolaska vatrogasaca.

U trenutku gašenja požara u tunelu tijekom akcije nema uhodano i prihvaćeno pravilo taktičkog nastupa. U akciju se ne ulazi s malim ljudskim snagama jer se brzo iscrpe zbog obveze primjene opreme za zaštitu organa za disanje i protiv topline. Uz poštivanje pravila spašavanja, valja se usredotočiti isključivo na akciju izvlačenja unesrećenih iz požara, a daljnji postupak prepustiti ekipama medicinske pomoći. Vrstu taktičkog zahvata uvjetuje lokacija požara u tunelu. Tu se ne može ni pogriješiti jer je jedino frontalni zahvat izvediv, ako je moguće doći do samog žarišta. [8]

#### **11.6.1. Požarni scenariji sa normalnim zapaljivim krutinama**

U ovu su grupu svrstani požari svih vozila koja prvenstveno služe za transport osoba te požari kamiona koji prevoze zapaljive krutine koje nisu klasificirane kao opasne tvari. Među ove krutine pripadaju mnogi zapaljivi građevinski materijali, uključujući drvo, ugljen i proizvode od ugljena, papirnati i celulozni proizvodi i slično. Ova vozila normalno će kao pogonsko gorivo sadržavati zapaljive tekućine (diesel gorivo ili benzin, rjeđe ukapljeni naftni plin), kao i zapaljive tekućine za pomoćne funkcije

poput mazivih ulja. Udio toplinskog sadržaja ovih opasnih tvari relativno je mali u odnosu na toplinski sadržaj tereta i opreme vozila, pa se ovdje neće posebno razmatrati. Ipak, u požarnom i vatrogasnom smislu, sadržaj zapaljivih tekućina je vrlo značajan jer se požar vrlo često širi njihovim istjecanjem, a gašenje lako zapaljivih tekućina, kao i tekućina ugrijanih na temperaturu višu od njihovog plamišta, u pravilu nije moguće postići samo primjenom vode. U male požare mogu se svrstati požari 1–2 osobna automobila. Toplinska snaga požara biti će približno 5 MW po automobilu. Gašenje požara ometa prisustvo negorivih materijala i sama konstrukcija vozila, koja stvara ograničene prostore teško dosegljive za vatrogasni medij. Uz to, prisustvo velike količine plastičnih materijala od oko 90 kg po vozilu, uzrokuje nastanak gustog toksičnog dima. Istjecanje upaljenih tekućina može pridonijeti prijenosu požara na ostala vozila. U tipičnom požaru srednje veličine izgara furgon ili „normalni“ manji kamion. Toplinska snaga požara biti će 30-40 MW, što odgovara površini od oko 90–120 m<sup>2</sup>. Granični uvjeti slični su onima u malom požaru, a dosegljivost prostora mediju za gašenje može dodatno otežavati primjerice zapaljiva cerada na kamionu koja pokriva teret. Veliki požar reprezentira zapaljeni veliki kamion s teretom, čija toplinska snaga iznosi 100- 200 MW, što odgovara površini izgaranja od oko 200-600 m<sup>2</sup>. Ovakav požar težak je za gašenje i na otvorenom prostoru. Pod povoljnim okolnostima, raspoloživi protok vatrogasne vode od 1200 L/min može biti dostatan za gašenje požara površine do oko 200 m<sup>2</sup>, tako da potreba za postavljanjem mobilnih cijevnih pruga za dobavu dodatne vode postaje realna opcija. Zbog jednostrane vatrogasne navale s uzvjetrene strane, potreban domet vatrogasnih mlaznica za pokrivanje čitavog HGV-a je približno 40-45m ako vatrogasna akcija započne na udaljenosti od oko 15 m od plamene fronte. Budući da se dometi mlaznica uvijek iskazuju za optimalni domet s nagibom od 320° prema horizontali, traženi je domet nemoguće postići u tunelu, jer je tjeme parabolične trajektorije mlaza osjetno više od visine tunela. Stoga će stvarni domet biti bitno manji. Pri sve ove 3 veličine požara treba računati da je spašavanja osoba moguće jedino tijekom faze razvoja požara, odnosno unutar realnog perioda od 4-8 minuta po zapaljenju. Razvijeni požar uspostavlja se nakon približno 10 minuta od zapaljenja, do kada će osobe u vozilima biti mrtve zbog utjecaja dima i topline.

### 11.6.2. Požarni scenariji sa zapaljivim tekućinama

Transport zapaljivih tekućina predstavlja najveći udio u transportu opasnih tvari zbog njihovog masovnog korištenja kao izvora energije za pogon motornih vozila i mnoštva drugih strojeva i uređaja pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem, kao i za proizvodnju toplinske i električne energije. Spremnici na autocisternama mogu imati sadržaj od 30 m<sup>3</sup> i više, a izrađuju se od aluminijskih legura ili nehrđajućeg čelika. Vanjski plašt im je jednostruk, a u unutrašnjosti sadrže pregrade za smanjivanje zapljuskivanja pri vožnji. Spremnici normalno nisu podijeljeni na komore, pa će u slučaju oštećenja iscuriti sva tekućina sadržana iznad razine pukotine. Požar svake zapaljive tekućine se može ugasiti samo primjenom vatrogasne pjene, pri čemu je za gašenje agresivnih polarnih tekućina nužno koristiti specijalne AR pjene. Požarni se scenariji prema veličini mogu podijeliti u 3 skupine. Tipični mali požar zapaljive tekućine nastati će zbog manjeg oštećenja transportnog spremnika autocisterne i istjecanja tekućine na kolnik, što će stvoriti lokvu površine oko 10 m<sup>2</sup>. Plameni nastalog požara snage približno 17 MW zahvaćati će spremnik, pa je opasnost od povećanja brzine istjecanja stalno prisutna.

Vatrogasnom intervencijom nastojati će se hlađenjem zaštititi spremnik od djelovanja topline, požar ugasiti, a pukotina začeptiti. Požar zapaljive tekućine srednje veličine imati će površinu od oko 100 m<sup>2</sup> i toplinsku snagu od oko 170 MW. Značajan dio istekle zapaljive tekućine može pridonijeti širenju požara najmanje do najbližih sifona. Vatrogasnom intervencijom nastojati će se hlađenjem zaštititi spremnik od djelovanja topline, požar ugasiti, a pukotina začeptiti. Veliki požar zapaljive tekućine nastao bi pri potpunom kidanju spremnika autocisterne ili njegovih armatura i naglom istjecanju cjelokupnog sadržaja na kolnik. Moguće je očekivati uspostavljanje pulsirajućeg izgaranja, a plameni jezici mogli bi imati takvu duljinu da požar prenesu i na obližnja vozila u smjeru niz vjetar. Tekućina bi vjerojatno premašila kapacitet odvodnje kanalizacijskog sustava i uzrokovala daljnje širenje požara. Kako je raspoloživi protok vatrogasne vode dostatan za gašenje požara površine najviše 150 m<sup>2</sup>, za eventualno uspješno gašenje bilo bi nužno postavljanje mobilnih cijevnih pruga za dobavu dodatne vode.

### **11.6.3. Požarni scenariji sa zapaljivim plinovima**

Pri požarnom scenariju sa zapaljivim plinovima vrlo je teško postaviti granice između malog, srednjeg i velikog akcidenta. Istjecanje zapaljivog plina uvijek nastaje kao posljedica oštećenja spremnika ili njegovih armatura, a maseni protok na pukotini ovisiti će o tome da li je plin u ukapljenom ili u komprimiranom stanju, da li je pukotina u području parne ili tekuće faze, tlaku u spremniku i slično. U svakom slučaju uspostaviti će se mlaz ističućeg plina, koji se može odmah zapaliti i time stvoriti plamenu buktinju. Ako buktinja izgara, ona predstavlja najbolji osigurač protiv eksplozije i ne smije se nikako ugasiti, ali se mogu hladiti zahvaćene površine. Posebna opasnost nastaje ako plamenovi dolaze u kontakt s plaštem spremnika, jer to može izazvati pojavu naglog i nepredvidivog širenja plamena. S druge strane, ako se plin ne upali odmah, stvoriti će se rastući oblak zapaljivog plina koji će se kretati niz vjetar sve dok ne dođe do izvora paljenja, što će izazvati eksploziju. Dok je u prvom slučaju moguća akcija hlađenja i akcija začepljenja pukotine, u drugom slučaju nema mogućnosti za djelovanje intervencijskih snaga. Treba imati u vidu da je svaka akcija u zatvorenom prostoru u kojem dolazi do oslobađanja zapaljivog plina zbog moguće eksplozije ekstremno rizična za vatrogasne snage, te je uvijek upitno da li intervenciju uopće poduzeti ili ne.

### **11.6.4. Požarni scenarij sa toksičnim zapaljivim tvarima**

Toksične zapaljive tvari mogu postojati u bilo kojem agregatnom stanju, a ako su plinovite, mogu biti ukapljene ili komprimirane. Izgaranjem takvih tvari često se eliminira njihova toksičnost, pa u tom slučaju nema širenja toksičnog oblaka. Ako izgaranjem nastaju drugi toksični produkti, situacija postaje složenija. Primijenjeni operativni postupak biti će specifičan za svaku toksičnu tvar posebno, njeno agregatno stanje, temperaturu, tlak i ostale parametre i bitno će ovisiti o mnogim specifičnim okolnostima na mjestu događaja. Ovakve intervencije u pravilu se izvode prema uputama eksperata za pojedinu toksičnu tvar. [9]



## **12. ZAKLJUČAK**

U cestovnom prometu tuneli su mjesta povećanog rizika. Zbog toga se u njima moraju primjenjivati posebno stroge mjere zaštite, od kojih mjere zaštite od požara zauzimaju značajno mjesto. Nekoliko katastrofalnih požara u tunelima zadnjih godina, na dramatičan način su upozorili kako tuneli predstavljaju vrlo rizična mjesta u cestovnom prometu. Prometna nesreća koja na otvorenoj cesti ne mora imati ljudskih žrtava, u tunelu, posebno ako je praćena vatrom, može prerasti u tragediju. Zbog toga se u tunelima moraju primjenjivati osobito stroge mjere zaštite od požara. Efikasna i pouzdana vatrodojava, dobar i pouzdan ventilacijski sustav i slične mjere zauzimaju veoma značajno mjesto obzirom da je otkrivanje požara u inicijalnoj fazi od presudne važnosti za kasniji tijek spašavanja putnika i očuvanja stabilnosti i cjelovitosti građevine, ali i za sigurnost profesionalnih snaga. Republika Hrvatska danas ima jedne od najsigurnijih tunela u Europi, a to dokazuju istraživački rezultati o sigurnosti u tunelima, koji su se počeli provoditi nakon katastrofalnog požara u tunelu Mont Blanc 1999. godine. Bez obzira koliko hrvatski tuneli bili sigurni od požara, treba nastojati poboljšavati sustave sigurnosti kako bi u što kraćem roku mogli reagirati. Kako je Republika Hrvatska turistička zemlja i koja u ljetnim mjesecima ima

puno putnika koji se služe tunelima, važno je da su hrvatski tuneli sigurni za prometovanje i da zadovoljavaju propisana pravila Europske unije o sigurnosti tunela.

## **POPIS PRILOGA**

### **Popis shematskih prikaza**

Shematski prikaz 1 – Postupanje u slučaju pokretanja požarnog alarma .....	3
Shematski prikaz 2 - Međuovisnost ključnih faktora sigurnosti u cestovnom tunelu prema opće prihvaćenoj klasifikaciji UNECE .....	4
Shematski prikaz 3 - Blok shema vatrodjave tunela Veliki Gložac – CDP1 .....	12
Shematski prikaz 4 - Blok shema vatrodjave tunela Veliki Gložac – CDP2 .....	13
Shematski prikaz 5 – Prikaz nastanka Raman-ovih valova .....	15
Shematski prikaz 6 – Faze razvoja požara .....	35

### **Popis slika**

Slika 1 – Tunel Veliki Gložac (južna cijev) .....	6
Slika 2 - Tunel Tauern nakon katastrofalnog požara .....	10
Slika 3 – Područje montaže svjetlovodnih kabela .....	17
Slika 4 - Ručni javljač požara tipa DM 1133 Siemens-Cerberus.....	20

Slika 5 - Adresabilni modul DC 1131 .....	21
Slika 6 - SOS niša sa aparatima za gašenje požara, adresabilnim modulom i ručnim javljačem požara.....	21
Slika 7 - Samostojeći ormarić sa vatrogasnim aparatima i kontaktnim javljačima .....	22
Slika 8 - Optičko-termički adresabilni javljač požara DOT 1131 .....	23
Slika 9 - Svjetlosni indikator DJ 119 .....	23
Slika 10 - Indikator prorade javljača iznad vrata trafostanice.....	24
Slika 11 – Prirodno provjetravanje tunela .....	26
Slika 12 – Uzdužno provjetravanje tunela s ventilatorima na stropu.....	26
Slika 13 – Sustav poprečne ventilacije .....	27
Slika 14 – Sustav polupoprečne ventilacije.....	27
Slika 15 – Izlazak dima iz tunela.....	28
Slika 16 - Razmještaj goriva i ciljnih objekata u testu prijenosa požara u tunelu .....	35
Slika 17 – Evakuacijski prolaz .....	39
Slika 18 – Oznaka izlaza u slučaju nužde.....	40

## Popis tablica

Tablica 1 - Rezultati mjerenja u napuštenom tunelu Repparfjord .....	8
Tablica 2 - Izgorjela količina goriva $f m\&$ (kg/min) za neke HRR .....	32

## Popis grafičkih prikaza

Grafički prikaz 1 - Rijkawaterstaatova požarna krivulja .....	10
Grafički prikaz 2 – Usporedba odaziva sustava nove generacije "Fast Response" i sustava prethodne generacije "Fibrolaser II" .....	16
Grafički prikaz 3 - Prikaz krivulja za aproksimaciju promjene HRR s protekom vremena.....	35

## POPIS LITERATURE

- [1]. Drakulić, M. : Djelovanje sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela u uvjetima požara, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [2]. Višnjic, V. : Analiza razvoja požara u cestovnim tunelima, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2011.
- [3]. Ivančir, N. : Sustav vatrodojave tunela Veliki Gložac, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2011.
- [4]. Security Guide, CERBERUS AG: Fire Protection, 1995.god
- [5]. Krajnik, Z. : Zaštita od požara u tunelima, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2015.
- [6]. Škrtić, B. : Suvremeni sustav vatrodojave i gašenje požara u tunelu, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2013.
- [7]. Pravilnik o sustavima za dojavu požara, NN 56/99,Zagreb
- [8]. Austrijske smjernice za projektiranje cestovnih tunela RVS 9.280, 9.281, 9.282

[9]. Regent, A.: Analiza mjera za prevenciju katastrofalnog požara u cestovnim tunelima, Doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2011.

Internetske stranice :

1. <http://www.vatrodojava.hr/> (21.11.2016.)
2. <http://www.prometna-signalizacija.com/> (22.11.2016.)
3. <http://www.hrbi.hr/> (25.11.2016.)