

POŽARI U TUNELIMA

Benčić, Valentina

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:128:984156>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-04**



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

Valentina Benčić

POŽARI U TUNELIMA

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2021. godina

Karlovac University of Applied Sciences

Safety and Protection Department

Professional undergraduate study of Safety and Protection

Valentina Benčić

FIRES IN TUNNELS

Final paper

Karlovac, 2021. godina

Veleučilište u Karlovcu
Odjel Sigurnosti i zaštite

Stručni studij sigurnosti i zaštite

Valentina Benčić

POŽARI U TUNELIMA

ZAVRŠNI RAD

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

Karlovac, 2021. godina

Završni zadatak



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 / specijalistički studij: Stručni studij Sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita od požara

Karlovac, 2021.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Valentina Benčić

Matični broj:0415616079

Naslov: POŽARI U TUNELIMA

.....
Opis zadatka:

- Osnovne značajke požara u tunelima
- Sustav za detekciju i dojavu požara u tunelima
- Preventivne mjere sigurnosti i zaštite od požara u tunelima
- Požar u tunelima uz osvrt na katastrofalne požare koji su se desili

Zadatak zadan:
10/2020

Rok predaje rada:
05/2021

Predviđeni datum obrane:
06/2021

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

Predsjednik ispitnog povjerenstva:
Mag. ing. cheming. Lidija Jakšić

PREDGOVOR

Osobito se zahvaljujem svojoj mentorici dr.sc. Snježani Kirin, viši pred. na predanom mentorstvu i uputama koje su mi olakšale cjelokupan proces.

Ovim putem želim se zahvaliti svim profesorima koji su u bitnom doprinijeli oblikovanju mojih novih kvaliteta, koje će me pratiti kroz život, jer su mi pokazali da samo vlastitim nastojanjem mogu usvojiti znanje. Njihov je trud, a moj je vječni kapital znanja i vjere u sebe.

Najveće hvala mojoj obitelji na vjeri u mene, podršci i razumjevanju.

SAŽETAK

U ovom radu opisuju se požari u tunelima, preventivne mjere sigurnosti i zaštite od požara u tunelima i sustav za detekciju i dojavu požara. Požari u tunelima predstavljaju veliku opasnost za sigurnost u tunelu i mogu dovesti do ozbiljnih posljedica ako im se ne pristupi na odgovarajući način. Gašenje požara u tunelima zahtjeva odgovarajuće postupanje nadzornog osoblja i vatrogasne postrojbe, te određeni način rada ventilacije.

KLJUČNE RIJEČI: požar, tunel, sigurnost, zaštita od požara u tunelima

SUMMARY

This final paper describes tunnel fires, preventive safety measures, fire protection, fire detection, and alarm safety in tunnels. Tunnel fires represent a major threat to safety because can lead to serious consequences if it is not approached properly. Extinguishing fires in tunnels require appropriate action by supervisory staff and the fire department and a certain mode of ventilation.

KEYWORDS: fire, tunnel, safety, fire protection in tunnels

SADRŽAJ:

| | |
|--|------------|
| Završni zadatak..... | I |
| PREDGOVOR..... | II |
| SAŽETAK..... | III |
| SADRŽAJ:..... | IV |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Predmet rada..... | 1 |
| 1.2. Cilj rada..... | 3 |
| 1.3. Metodologija rada..... | 3 |
| 2. POZNAVANJE OPĆIH POJMOVNIH KONOTACIJA VEZANIH UZ POŽARE, TUNELE I ZAŠTITU OD POŽARA..... | 4 |
| 2.1. Pojmovni aspekti požara..... | 4 |
| 2.2. Opće značajke o tunelima..... | 7 |
| 3. PREGLED ZNAČAJKI POŽARA U TUNELIMA..... | 11 |
| 3.1. Karakteristike požara u tunelima..... | 11 |
| 3.2. Raslojavanje dima u tunelima..... | 12 |
| 3.3. Duljina plamena..... | 15 |
| 3.4. Situacijska analiza velikih požara u tunelima s velikim uzdužnim protokom zraka..... | 17 |
| 3.4.1. <i>Požarno opterećenje vozila.....</i> | <i>18</i> |
| 4. PRISTUPI OSIGURANJA ZAŠTITE OD POŽARA U TUNELIMA..... | 21 |
| 4.1. Požarna sigurnost u tunelima..... | 21 |
| 4.1.1. <i>Razumijevanje sustava tunel-vozilo-čovjek.....</i> | <i>23</i> |
| 4.1.2. <i>Integrirani pristup sigurnosti tunela.....</i> | <i>24</i> |
| 4.1.3. <i>Kriteriji razine sigurnosti.....</i> | <i>27</i> |
| 4.2. Kategorizacija metoda za provjeru prema tretmanu neizvjesnosti..... | 28 |
| 4.2.1. <i>Neizvjesnost.....</i> | <i>28</i> |
| 4.2.2. <i>Šest razina nesigurnosti.....</i> | <i>29</i> |
| 4.3. Analiza rizika za cestovne tunele..... | 30 |
| 4.3.1. <i>Pristup zasnovan na scenariju.....</i> | <i>31</i> |
| 4.3.2. <i>Pristup zasnovan na sustavu (QRA).....</i> | <i>32</i> |
| 4.4. Ostvarenje protupožarne zaštite u tunelima..... | 33 |
| 4.4.1. <i>Oprema za otkrivanje i nadzor požara.....</i> | <i>34</i> |
| 4.4.2. <i>Gašenje požara.....</i> | <i>35</i> |
| 4.4.3. <i>Evakuacija i rizik po život.....</i> | <i>36</i> |
| 4.4.4. <i>Konstruktivna sigurnost.....</i> | <i>37</i> |

| | |
|--|-----------|
| 4.5. Iskustveni sigurnosni poučci u vezi s katastrofalnim požarima u tunelima u prošlosti – analitički pogled | 38 |
| 5. ANALIZA POŽARA U TUNELU TAUERN..... | 41 |
| 6. ZAKLJUČAK | 43 |
| 7. LITERATURA..... | 45 |
| POPIS SLIKA..... | 48 |

1. UVOD

1.1. Predmet rada

Tuneli predstavljaju ključni dio svjetskog prometnog sustava s ulogom u prijevozu ljudi i tereta. Događaji iz prošlosti pokazuju da požar predstavlja ozbiljnu prijetnju sigurnosti u tunelima. U posljednjim desetljećima preko četiri stotine ljudi širom svijeta umrlo je kao rezultat požara u cestovnim, željezničkim i metro tunelima [1].

Samo u Europi požari u tunelima zaustavili su vitalne dijelove cestovne mreže i koštali europsko gospodarstvo milijarde eura. Katastrofe poput tunela Mont Blanc (Italija, 1999.) i novijih požara u tunelima pokazuju da se hitnim situacijama kod požara u tunelima mora upravljati putem globalnog sigurnosnog sustava i strategijama, koje će biti sposobne integrirati otkrivanje, ventilaciju, evakuaciju i adekvatan opći odgovor na požare, održavajući što je moguće manje štete za putnike, spasilačke timove i strukture [2].

Pod nazivom tunel podrazumijeva se prolaz koji može biti iznad ili ispod zemlje, te je u potpunosti zatvoren, osim otvora na izlazima koji su uobičajeni na svakom kraju tunela [3].

Sagledavajući situacije pojava požara u tunelima, prvo od čega treba poći jest očekivati da se tuneli ponašaju slično podrumu. Vjerojatno će biti ograničen pristup tunelu, a način pristupa vjerojatno će biti jednak putu odlaska dima. Kretanje dima iz vatre često se smatra dijelom početnog dizajna tunela. U nekim će slučajevima biti osovine na površinu u intervalima duž duljine tunela, što će omogućiti izlaz dima. Često će biti osigurani fiksni ventilacijski sustavi za dovod svježeg zraka za ljude i vozila, a i oni mogu odvoditi dim iz tunela. Vjerojatno će nedostajati prirodne ventilacije unutar tunela i tunel se može smatrati visoko izoliranim prostorom. Ova dva aspekta djeluju zajedno kako bi se složili učinci požara u okolišu tunela jer visoko izolirana zatvorena priroda tunela znači da se toplina ne gubi u atmosferi već da ostaje na mjestu požara. Na razvoj požara može utjecati nedostatak dotoka kisika unutar tunela ispunjenog dimom [4].

Često zakrivljena priroda stropa tunela znači da će dim koji se širi njegovom duljinom biti daleko brži od ekvivalentne vatre u odjeljku. Visina sloja dima također će se vjerojatno smanjiti u usporedbi s onom u požaru u odjeljku iste magnitude. Za tipičan požar u malom odjeljku, vrući plinovi i dim će se dizati do stropa i širiti se po krovu, postupno puneći odjeljak. U tunelu je stropni prostor, barem u početku, prevelik da bi ga mogao ispuniti dim [5].

Prepušteni sami sebi, dim i vrući plinovi širit će se duž krova tunela u oba smjera. Uzdužna ventilacija može kontrolirati protok dima, gurajući sve to u jednom smjeru. Ako je protok zraka za ventilaciju prespor, vrući dim i plinovi mogu se potisnuti uzvodno prema glavnom protoku zraka. Ovaj gornji vrući sloj prestat će putovati nakon što se ohladi dovoljno da sila ventilacijskog zraka prevlada uzlazne sile preostale u ohlađenim plinovima. Nizvodno će vrući plinovi i dim putovati na velike udaljenosti u razini krova, a sloj će padati kako se hladi. Ako se ohladi na temperaturu okoline, plinovi i dim padat će na razinu poda uzrokujući dimni čep. Ako dovod zraka u vatru dolazi s istog kraja s onog s kojeg izlaze vrući plinovi i dim, ovaj dimni čep povući će se natrag u tunel zajedno sa dovodom svježeg zraka [5].

Teoretska znanja i činjenice će poslužiti za daljnju provedbu istraživanja i pronalaženje ključnih čimbenika utjecaja ljudskog ponašanja na dinamiku požara u tunelu, na temelju provedene sekundarne analize istraživanja, osobito ima li se u vidu da se ljudi koji su uključeni u incident u tunelu ili podzemnoj građevini mogu ponašati neočekivano ili nepredvidivo, što može utjecati na vatrogasne i spasilačke akcije jer su putnici možda ostali unutar tunela, a nisu evakuirani. Pravilnim uočavanjem inherentnih rizika kod požara u tunelu kao što su:

- Pristupni putovi vjerojatno će biti jednaki putovima izlaska dima
- Nedostatak ventilacije ili nedostatak prirodnog svjetla.
- Zračna toplina se pojačala
- Tuneli su visoko izolirani prostori koji omogućuju brži rast požara.
- Povećani rizik od strukturnih oštećenja i izlivanja

pronaći će se odgovarajući zaključci i smjernice za potencijalno unaprijeđenje upravljanja požarima u tunelu kad do istog dođe.

1.2. Cilj rada

Cilj rada je objasniti teoretske postavke o požarima, osnovnu podjelu i faze razvoja, dati naznaku poimanja tunela, kao i osnovne značajke požara u tunelima, sustav za detekciju i dojavu požara u tunelima, te na kraju iznijeti preventivne mjere sigurnosti i zaštite od požara u tunelima, uz osvrt na katastrofalne požare koji su se dogodili u prošlosti.

Razvidno je da se protupožarna strategija u tunelima temelji na implementaciji zakona prirodnih znanosti i učenjem iz prošlih situacija požara, pri čemu je zadatak da se u budućnosti nešto slično ne dogodi, odnosno da tuneli budu u službi prometne i ljudske sigurnosti, što je i sama svrha prometnog sustava cjelini.

1.3. Metodologija rada

Metodologija rada obuhvaća predmet i cilj istraživanja, korištenje znanstvenih metoda i izvora, te samu strukturu rada.

2. POZNAVANJE OPĆIH POJMOVNIH KONOTACIJA VEZANIH UZ POŽARE, TUNELE I ZAŠTITU OD POŽARA

Požari u tunelima mogu biti katastrofalni zbog razmjera izgubljenih života i oštećenja imovine. Posebna priroda požara u takvim zatvorenim prostorima predstavlja posebne izazove za vatrogasne inženjere, zdravstvene i sigurnosne stručnjake i hitne službe [7].

2.1. Pojmovni aspekti požara

Požar je „nekontrolirano gorenje koje nanosi materijalnu štetu ili ugrožava ljudske živote, pa se po tome požar razlikuje od vatre. S gledišta vatrogasnih intervencija, požari se razlikuju po fazama razvoja, po veličini, po mjestu nastanka i po vrsti gorive tvari“ [8].

„Požari se razlikuju prema mjestu nastanka, vrsti materijala koji gori, obujmu, fazi razvoja, itd. Prema mjestu nastajanja dijele se na unutrašnje i vanjske požare“ [9].

„Prema vrsti gorive materije po europskoj klasifikaciji požari se svrstavaju u pet klasa:

- KLASA A: U klasu A se svrstavaju požari čvrstih materijala koji sagorijevaju plamenom i žarom, npr. drvo, papir i slični materijali.
- KLASA B: U klasu B se svrstavaju požari zapaljivih tekućina, npr. derivati nafte, boje, lakovi itd. Za gašenje se koristi prah, ugljik dioksid ili pjena.
- KLASA C: U klasu C spadaju požari zapaljivih plinova, npr. metan, propan, butan, acetilen, itd. Za gašenje se najčešće koristi prah.
- KLASA D: U klasu D spadaju požari lakih metala, npr. aluminij, magnezij i njihove legure. Za gašenje se koriste samo suha sredstva (posebne vrste prah, suhi kvarcni pijesak).
- KLASA F: U klasu F spadaju požari biljnih i životinjskih ulja i masnoća“ [9].

U požaru se mogu prepoznati tri faze: „početna, razbuktala i faza živoga zgarišta. Obilježje početne faze slab je intenzitet izgaranja, pa se vatra širi prilično sporo. Čvrste tvari izgaraju dulje od tekućih ili plinovitih, a na brzinu širenja požara bitno

utječe i toplina, koja proporcionalno raste i zagrijava okolni zrak“ [8]. „Razbuktala faza ističe se po najvećem intenzitetu izgaranja, najvišim temperaturama i najvećoj brzini širenja požara. U toj se fazi ruše dijelovi konstrukcija ili cijele građevine“ [8]. „Faza živoga zgarišta nastaje kada vidljivi dijelovi izgore, pa je intenzitet gorenja vrlo malen ili je vatra zatrpana konstrukcijom. Ako se takvo zgarište nakon gašenja temeljito ne pregleda, požar se može ponovno pojaviti, najčešće zahvaćanjem materijala koji u prethodnoj fazi nije potpuno izgorio“ [8].

Požar u svojim fazama razvoja ima različite oblike, koji se u konačnom slučaju svode na kemijsku reakciju između gorivog materijala i kisika iz zraka uz osnovnu pojavu, i to toplinu i druge produkte gorenja. Unutar zatvorenog prostora zgrade požar može uzrokovati ljudske, materijalne i druge gubitke. S obzirom na materijal, režim gorenja u požaru ovisi o nizu čimbenika, a ne samo o kemijskom sastavu materijala [10].

Kako bi se razumjelo pojmovne aspekte požara, potrebno je biti upoznat i s pojedinim pojmovima. U Republici Hrvatskoj referentan je Zakon o zaštiti od požara (NN 92/2010). Tako u članku 2. imenovanog zakona stoji: [11]

- „Požar je samopodržavajući proces gorenja koji se nekontrolirano širi u prostoru“ [11].
- „Gorenje je brza kemijska reakcija neke tvari s oksidansom, najčešće s kisikom iz zraka u kojoj nastaju produkti gorenja te se oslobađa toplina, plamen i svjetlost“ [11].
- „Tehnološka eksplozija je naglo širenje plinova uslijed gorenja ili druge kemijske reakcije“ [11].
- „Požarni rizik je vjerojatnost nastanka požara u danim procesima ili stanjima“ [11].
- „Ugroženost od požara je potencijalna opasnost od požara za zdravlje ili život ljudi i materijalnih dobara“ [11].
- „Otpornost na požar je sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost (R) i/ili cjelovitost (E) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo, kako je propisano normom o ispitivanju otpornosti na požar“ [11].

- „Reakcija na požar je doprinos materijala razvoju požara uslijed vlastite razgradnje do koje dolazi izlaganjem tog materijala određenim ispitnim uvjetima“ [11].
- „Neposredna opasnost je stanje visokog požarnog rizika, koje može u bliskoj budućnosti dovesti do požara“ [11].
- „Evakuacijski put iz građevine je posebno projektiran i izveden put koji vodi od bilo koje točke u građevini do vanjskog prostora ili sigurnog prostora u građevini, čije značajke (otpornost i reakcija na požar, širina, visina, označavanje, protupanična rasvjeta i dr.) omogućuju da osobe zatečene u požaru mogu sigurno (samostalno ili uz pomoć spasitelja) napustiti građevinu“ [11].

Požar može biti „malen, srednji, velik i katastrofalan. U malom požaru zahvaćena je manja količina gorive tvari. Ako se takav požar pravodobno uoči, može se ugasiti priručnim sredstvima ili ručnim vatrogasnim aparatom“ [8]. „U srednjem požaru gori jedna prostorija neke građevine ili više njih, ili veća količina gorive tvari, a za njegovo gašenje potrebna manja vatrogasna postrojba s odgovarajućom opremom“ [8]. „U velikom požaru gori krov, tavan, kat ili podrum veće građevine ili veća količina goriva na otvorenom (veća skladišta, požar razlivena tekućega goriva, veliki poljski i šumski požar itd.)“ [8]. „Tu vrstu požara gasi veća vatrogasna postrojba s više opreme. Katastrofalni požar je onaj u kojem gori više građevina ili naselje, ili su njime zahvaćena velika šumska područja, velika skladišta ili postrojenja na otvorenom. Njegovo gašenje zahtijeva sudjelovanje više vatrogasnih postrojba, često uz vojne postrojbe i postrojbe civilne zaštite, pa i mobilizaciju stanovništva. Koordinirano gašenje katastrofalnoga požara može trajati više dana, pa i tjedana“ [8].

Prema mjestu nastanka „požar može biti unutarnji ili vanjski. Unutarnji požar razvija se u zatvorenom prostoru, u jednoj ili više prostorija unutar građevine, a može se razviti u vanjski požar ako vatra rušenjem, eksplozijom ili na neki drugi način probije pregrade požarnoga sektora“ [8]. „U vanjskom požaru gore vanjski dijelovi objekta ili je to šumski ili poljski požar, požar otvorenih skladišta, prijevoznih sredstava, zapaljivih tekućina na otvorenom i slično“ [8].

„Spašavanje ljudi iz građevina ugroženih požarom osnovna je i najvažnija zadaća vatrogasnih postrojba. Pritom se uvijek može očekivati pojava otrovnih para i plinova,

iznenadno urušavanje građevina, propadanje ljudi kroz nastale otvore, zatrpavanje prolaza, nestanak svjetla, a i velika vrućina, eksplozija opasnih tvari, para lako zapaljivih tekućina, plinova i prašine“ [8]. „Tom se prilikom razvija velika količina topline koja se prenosi na susjedne zapaljive tvari i djeluje na proširenje požara. I dim znatno utječe na stvaranje panike među ugroženim osobama“ [8]. „Pod evakuacijom se razumijeva organizirano izlaženje ljudi iz ugroženih građevina ili ugroženoga područja. Glavni su putovi evakuacije hodnici, glavno stubište, predvorje i glavni izlaz iz građevina na slobodan vanjski prostor, dok su pomoćni putovi sporedno stubište i dizala. Zbog opasnosti od nestanka struje pomoćni se putovi koriste samo iznimno. Izlaz u slučaju opasnosti svaki je put koji vodi iz ugroženih prostorija na sigurno“ [8].

„Prema vrstama gorivih tvari razlikuje se požar u kojem izgaraju čvrste organske tvari, zapaljive tekućine, plinovi i laki metali te požar pod utjecajem ili u prisutnosti električne struje, pa se prema tomu razlikuju i sredstva i način gašenja“ [8].

2.2. Opće značajke o tunelima

Tuneli se odnose na bilo koji zatvoreni prolaz. Obično tuneli prolaze pod zemljom kako bi zaobišli prirodne barijere i smanjili troškove i utjecaj nadzemne gradnje [4].

Jedna od važnih odluka koju inženjeri moraju donijeti u procesu projektiranja tunela su metode gradnje koje će koristiti. Izgradnja objekata na površini zemljišta ne uspoređuje se sa složenošću gradnje tunela. Izgradnja tunela obično se odvija pod zemljom. Dugi tunel obično ima više složenosti ako se geološki krajolik jako promijeni [12].

Međutim, čak i u područjima s jednoličnim geološkim sastavima, lokalne karakteristike stijena i tla mogu utjecati na izgradnju tunela. Inženjeri obično koriste četiri metode gradnje tunela. Čimbenici koji utječu na odabir metoda gradnje tunela su sljedeći: Prvo, dubina tunela jedno je od glavnih zabrinjavajućih pitanja. Plitki tuneli izgrađeni unutar gradova koji služe kao akvadukti ili kao podzemne autoceste omogućuju inženjerima da koriste rovove. Ako tunel treba proći ispod vodenog tijela ili kroz brdo, inženjeri će favorizirati metode koje im omogućavaju da probuše rupu u stijenskoj masi [12].

Drugo, metode gradnje ovisit će o namjeni tunela. Tuneli koji se koriste za transport vode i kanalizacije ili za polaganje komunikacijskih kabela mogu biti promjera samo nekoliko metara. Međutim, ako je tunel potreban za osiguravanje prometnog puta za autocestu, načini gradnje razlikovat će se od manjih tunela [12].

Treća pitanja koja inženjeri imaju na umu kada se odluče za najbolje metode gradnje tunela koje se koriste je stabilnost okolnog materijala. Ako tunel prolazi kroz čvrstu stijenu, tada će se metode uporabe razlikovati u usporedbi s tunelom koji prolazi kroz rastresit pijesak ili glinu. Metoda će se također razlikovati ako bi tunel trebao prolaziti ispod vodenog tijela ili ispod nivoa vode [12].

Potreba za izgradnjom tunela pod vodom proizlazi iz nekoliko situacija. Prvo, možda ima smisla izgraditi tunel ispod velike rijeke ili mora umjesto mosta kako bi se izbjeglo ometanje morskog prometa. Primjerice, umjesto izgradnje mosta kojim bi se kopno povezalo s otokom, možda je bolje izgraditi tunel kako bi se izbjeglo prekidanje morskog prometa oko otoka. Podvodni tuneli mogu se graditi kako bi se osiguralo sredstvo za prelazak rijeke. U ovom slučaju most se može isključiti zbog troškova, posebno ako rijeka služi kao plovni put. Uz to, podmorski su tuneli idealni tamo gdje trajekti nisu praktični ili ih je nemoguće koristiti. Morski kanali uglavnom pružaju pristup velikim otocima ili se spajaju s dva glavna kopna odvojena morem [12].

Podvodni tuneli također su idealni jer ne zahtijevaju zatvaranje za vrijeme lošeg vremena. Mostovi ili trajekti, s druge strane, ne mogu raditi puno radno vrijeme jer na njih utječe loše vrijeme. Podvodne tunele teško je izgraditi, ovisno o dubini vode i duljini potrebnog tunela [12].

Podvodni tuneli obično ne vode koritom plovnog puta, već ispod korita vodenog tijela. Izgradnja tunela na koritu vodnog tijela dodaje još izazova procesu izgradnje tunela [12].

Inženjeri također odabiru metode projektiranja i gradnje tunela na temelju seizmičke aktivnosti određene regije. Ako tunel prolazi kroz područje s velikom geološkom aktivnošću, projekt treba uzeti u obzir utjecaje tih aktivnosti na rad tunela. Istraživanja pokazuju da tuneli izbušeni u dubinama do 500 metara imaju bolju otpornost na seizmičke smetnje u odnosu na tunele izbušene u manjim dubinama [14].

Četiri glavne tehnike korištene u izgradnji tunela su kako slijedi:

- Prva tehnika je rezanje i pokrivanje tunela. Ova metoda uključivala je kopanje rova i njegovo pokrivanje kako bi se stvorio tunel. Stvarne metode koje se koriste ovise o raspoloživom prostoru za izgradnju i konačnoj namjeni tunela [15].

Popularno je u područjima gdje su tuneli potrebni za osiguravanje više autocesta ispod postojećih cesta ili u drugim stisnutim prostorima. U varijaciji odozgo prema dolje, inženjeri su izrezali kanale na krajnjim krajevima tunela, a zatim konstruirali zidove, te konačno krov stvarajući komoru [15].

Radovi na iskopavanju nastavljaju se pod krovom tunela prije konačne izgradnje poda tunela. U varijaciji odozdo prema gore, nakon što su zidovi izgrađeni, inženjeri iskopaju područje između zidova, a zatim grade tunel od temelja, završavajući krovom tunela [15].

- Druga metoda gradnje tunela je metoda eksplozije i bušenja. Ova se metoda primjenjuje na područjima gdje je potrebno probijanje kroz stijenu. Inženjeri koriste eksplozive za opuštanje kamena i uklanjanje otpada. Ova je metoda idealna za planinska područja i na mjestima gdje je temeljna podloga čvrsta [15].

Međutim, zbog varijacija u stijenskim formacijama, potrebno je provoditi bušenje u područjima s labavim stjenovitim slojevima, gdje miniranje može rezultirati potpunim urušavanjem tunela. U tim su slučajevima potrebni i neki građevinski radovi kako bi se pružila potpora tunelu [15].

- Treća glavna tehnika je probijanje tunela. Ova metoda koristi upotrebu stroja za bušenje tunela (TBM). TBM-ovi čine tuneliranje predvidljivim i često mogu biti isplativiji. Glavna primjena TBM-a je ta što omogućuju kopanje dugih tunela [15].

Najbolje djeluju u područjima gdje je okolni materijal dovoljno jak da podupire duge dijelove tunela bez potrebe za potporom. Ovi strojevi najbolje rade u određenom rasponu tvrdoće stijene. Ako su stijene vrlo tvrde, istrošenost strojeva može biti vrlo velika. U ovom je slučaju bolje koristiti metode miniranja i bušenja [15].

Još jedna prednost korištenja TBM-a je ta što mogu biti opremljeni senzorima koji određuju kada se mijenjaju formacije stijena. To pomaže u donošenju odluka o tome kako dalje [15].

- Četvrta metoda je metoda sekvencijalnog iskopa (SEM). Ova se metoda temelji na razumijevanju da se tuneliranjem preusmjeravaju unutarnja naprezanja u stijenskim formacijama [15].

Kao takav, SEM ima za cilj stvaranje okruženja koje je prilično slično postojećim naprezanjima u stijenama. To se postiže pažljivim proračunom naprezanja i korištenjem konstrukcija na takav način da ukupne sile ostanu kakve su bile prije izgradnje tunela. To dovodi do smanjenja količine građevinskog materijala koji je obično potreban za stabilizaciju tunela ukopanih u mekom tlu [15].

Zaključno se može reći da će se gradnja tunela vremenom poboljšavati, jer će biti potrebno više tunela kako bi se povećala povezanost u raznim dijelovima svijeta. Tuneli su također vrlo atraktivni zbog ograničenih utjecaja na okoliš koje proizvode.

3. PREGLED ZNAČAJKI POŽARA U TUNELIMA

Čini se da nema statističkih dokaza da se požari javljaju učestalije ili rjeđe u tunelima nego na otvorenom, međutim požari koji se dogode u tunelima imaju tendenciju imati ozbiljnije posljedice [21].

3.1. Karakteristike požara u tunelima

Požar je manifestacija kemijske reakcije, ali način gorenja može ovisiti više o fizikalnom stanju i raspodjeli goriva, kao i njegovoj okolini, negoli o njegovoj kemijskoj prirodi. Razumijevanje ponašanja požara općenito zahtijeva znanje kemije, prijenosa topline, dinamike fluida itd., a ponašanje požara u tunelu još je i kompleksnije. Kada se uspoređuje požar u tunelu s požarom na otvorenom, autor Ingason u svojoj studiji iz 2005. godine ukazuje na dvije važne činjenice: refleksija topline na gorućim vozila učinkovitija je kod požara u tunelu zbog zatvaranja i interakcije ventilacije s rastućom vatrom. Odbijanje topline uzrokuje povećanje intenziteta gorućeg vozila i može povećati brzinu otpuštanja topline do tri puta [22].

Interakcija ventilacije i vatre stvara aerodinamičke smetnje u protoku zraka kroz tunel, što može prouzročiti promjene u načinu ventilacije, poput prigušivanja protoka zraka i povratnog toka vrućih plinova i dima iz vatre u ventilacijski tok u procesu zvanom backlayering. Ovi učinci kompliciraju gašenje požara, a također i transport otrovnih dimova i plinova daleko od vatre [22].

Istoimeni autor nadalje ističe kako je također usporedio požare u tunelima s požarima u odjeljcima (primjerice sobama u zgradama) i navodi tri glavne razlike. Prvo, maksimalna brzina otpuštanja topline (HRR) odjeljka požara ovisi o prirodnoj ventilaciji, koja se određuje površinom i visinom vatre u pretincu. U tunelima prirodna ventilacija ovisi o veličini požara, nagibu tunela, površini presjeka, dužini tunela, vrsti tunela (u pravilu to je beton obložen stijenom) i meteorološkim prilike na ulazu u tunel. Tuneli često imaju uzdužnu ventilaciju koja utječe i na učinkovitost izgaranja [22].

Drugo, požari u odjeljcima mogu eksalirati u nekoliko minuta, ali je to malo vjerojatno da će se dogoditi u požaru tunela zbog velikih gubitaka topline na okolne zidove, i a radi nedostatka zadržavanja vrućih vatrenih plinova. Međutim, unutar smještene kabine kamiona ili vlaka unutar tunela, može doći do prebacivanja. Treće, u ranim fazama pretinca puca gornji sloj uzgorskog dima, a ispod je hladni sloj bez dima. Ako je u tunelu vrlo mala uzdužna ventilacija, u njoj se može stvoriti ista vrsta dimnog sloja u ranim fazama požara. Dalje od izvora vatre, dim će se spuštati do poda. Udaljenost na kojoj se to događa ovisi o veličini požara, vrsti tunela, te opsegu i visini presjeka tunela [22].

Ako se poveća ventilacija, raslojavanje dima će se otopiti, a na uzvodnoj strani toka stvorit će se slojevi požara, pri čemu se raslojavanje dima nizvodno od požara određuje vrućinom gubitaka na okolnim zidovima, te turbulentnim miješanjem uzgorskog sloja dima i suprotnim kretanjem hladnog zraka odozdo. Postoje dva načina izgaranja koja je važno znati i razlikovati, a to su vatra pod nadzorom goriva i vatra pod kontrolom ventilacije [22].

Vatra kontrolirana gorivom znači da je kisik u neograničenoj opskrbi i da brzina izgaranja ne ovisi o masenom protoku zraka (brzini opskrbe kisikom), te se umjesto toga određuje masenim protokom isparenog goriva (brzina opskrbe gorivom). Vatra kontrolirana ventilacijom ima ograničenu opskrbu kisikom, a brzina izgaranja ovisi i o opskrbi zrakom i gorivom. Na preciznoj razini kisika koja omogućuje potpuno izgaranje, kaže se da je smjesa stehiometrijska. U navedenom smislu važno je odrediti je li požar kontroliran gorivom ili ventilacijom, te omjer ekvivalencije zrak-gorivo [22].

3.2. Raslojavanje dima u tunelima

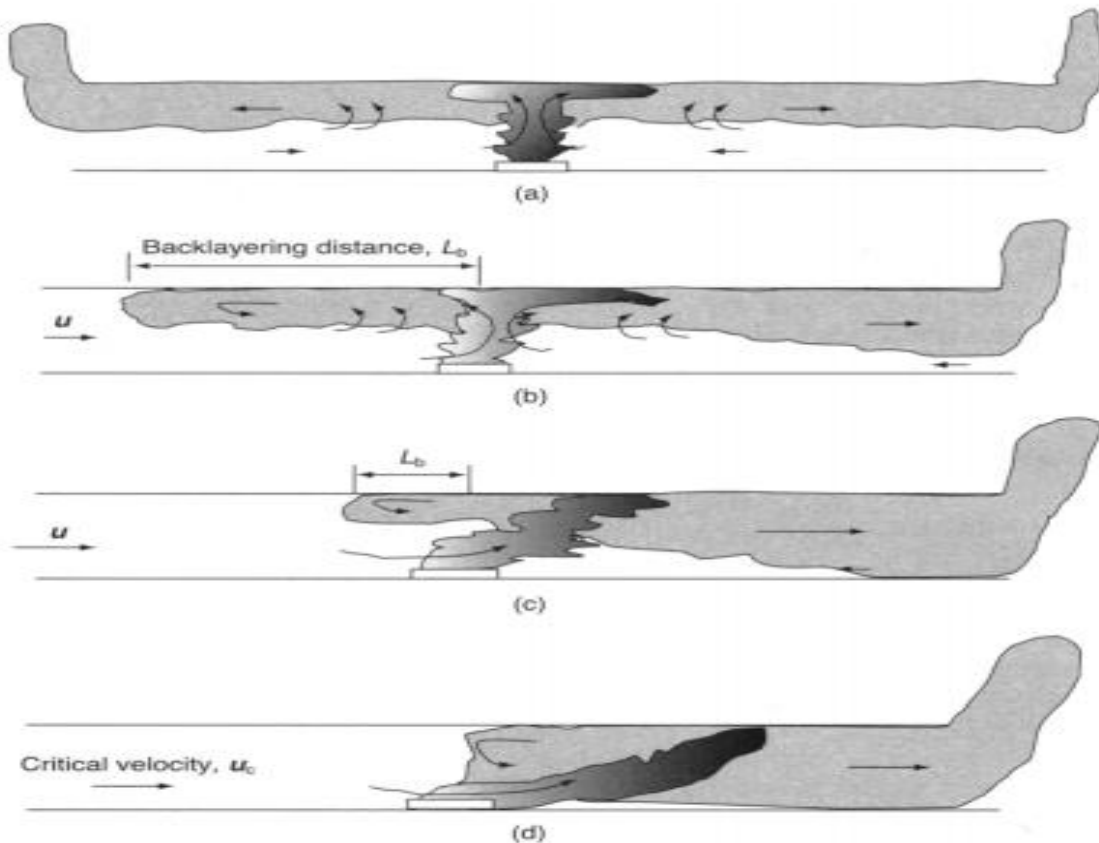
U požarima s kontroliranim gorivom dim se raslojava, što je važno za one koji pokušavaju pobjeći vatri. Širenje dima jako ovisi o brzini zraka u tunelu, što može biti ilustrirano pomoću tri tipična raspona brzine zraka: [22]

- slaba ili nikakva prisilna ventilacija (0-1 m / s),
- umjerena prisilna ventilacija (1-3 m / s), i

- visoka prisilna ventilacija ($> 3 \text{ m / s}$).

Kad je brzina zraka mala, npr. u tunelima s prirodnom ventilacijom, raslojavanje dima je obično visoko oko izvora požara. Udaljenost povratnog sloja može biti prilično dugo, a ponekad dim putuje gotovo jednakim udaljenostima u oba smjera, kako je to vidljivo na slici 1.

Na dijelu slike 1-a, vidljivo je da kada je brzina blizu 1 m / s , povratni sloj se javlja uzvodno od izvora vatre, za udaljenost do 17 puta veću od visine tunela. Kada tunel ima umjerenu prisilnu ventilaciju, uslojavanje dima u blizini izvora požara jako ovisi o brzini zraka, te se može zaključiti da što je veća brzina ventilacije, to je kraća udaljenost povratnog sloja. Za brzine zraka od $1\text{-}3 \text{ m / s}$, udaljenost naslaga može iznositi do 17 puta više od visine tunela, kako je to vidljivo na dijelu slike 1-b.



Sl.1. Shema raslojavanja dima, [22]

Nadalje, kako je na istoj slici u dijelu 1-c i 1-d vidljivo, u trećoj skupini, raslojavanje dima obično je nisko nizvodno od vatre i tamo je malo ili nimalo zaostalih slojeva.

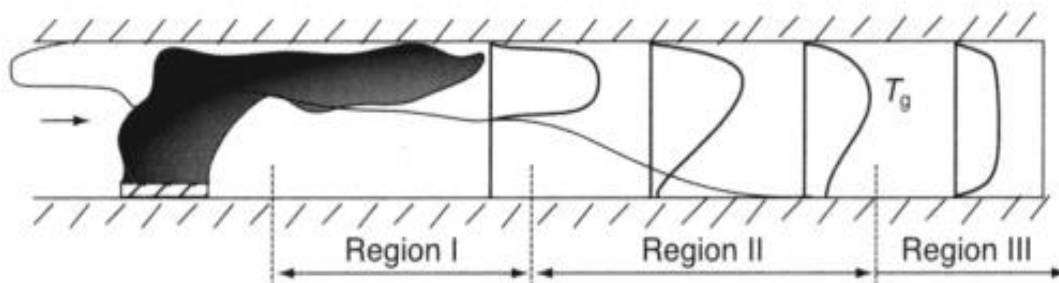
Brzina zraka potrebna za sprječavanje zaostajanja se naziva kritičnom brzinom (Ingason, 2005.) [22].

U vezi s navedenim, vrijedi spomenuti da je autor Newman u svojoj studiji iz 1984. godine, pokazao da kod požara u tunelu postoji korelacija između raspodjele lokalne temperature i lokalne masne koncentracija kemijskih spojeva [22].

Ingason i Persson u svojoj studiji iz 1999. godine pokazali su korelaciju između lokalne optičke gustoće dima (vidljivosti), temperature i koncentracija kisika. Ingason polazeći od navedene postavke, smatra opravdanim pretpostaviti da postoji korelacija između lokalne stratifikacije temperature, plinovitog sastava i raslojavanja dima u tunelima. Stratifikacija temperature ovisi o parametrima brzine zraka, brzine otpuštanja topline (HRR) i visine tunela, što se može povezati s brojem Froudea (Fr) [22].

Newman je u svojoj studiji iz 1984. godine definirao tri različite temperature stratifikacijskih područja temeljenih na Froudeovom broju, kako je to vidljivo na slici 2. U prvoj regiji ($Fr \leq 0.9$), raslojavanje je ozbiljno, a vrući proizvodi izgaranja putuju po stropu, temperatura u blizini poda je blizu onoj okoline. Stratifikacija temperature u ovom području je definirana uzgonom kojim dominira. U drugoj regiji ($0.9 \leq Fr \leq 10$) raslojavanje nije ozbiljno, ali još uvijek uključuje vertikalne gradijente temperature i uglavnom se kontrolira smjesom [22].

Može se zaključiti da postoji jaka interakcija između brzine ventilacije i uzgona. U trećem području ($Fr > 10$) postoji mali ili nikakav vertikalni gradijent temperature, a time i malo ili nimalo raslojavanja [22].



Sl.2. Stratifikacija temperature [22].

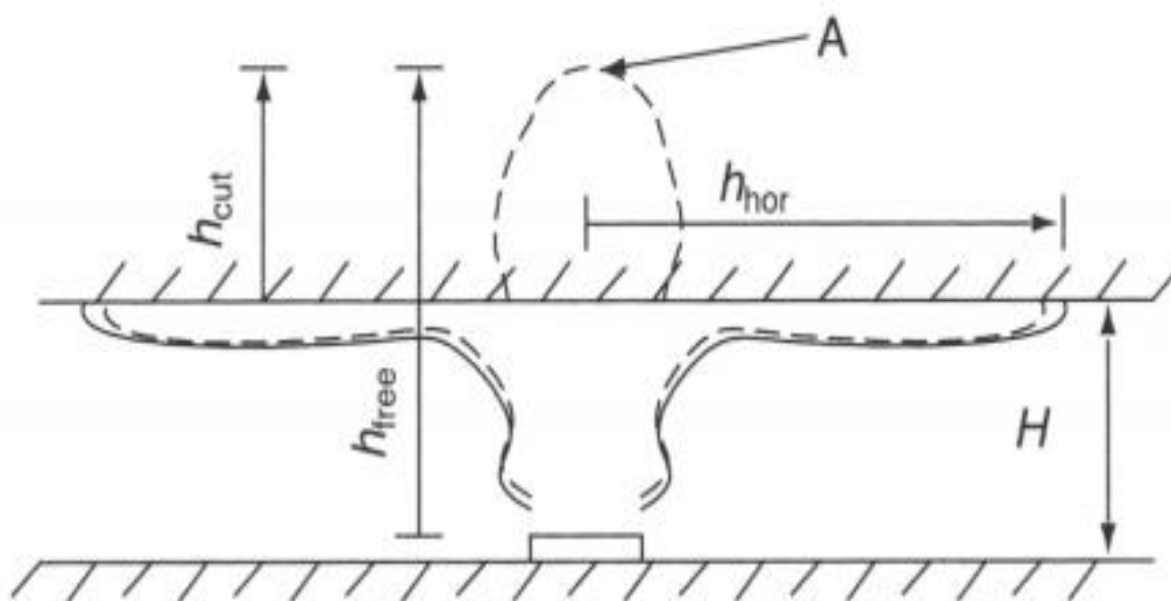
Newman je nadalje u svojoj studiji iz 1984. godine predstavio formulu za izračunavanje Froudeova broja koja vrijedi za tunele [22].

3.3. Duljina plamena

Visina svjetlećeg plamena ovisi o brzini opskrbe gorivom, brzini uvlačenja, kao i svojstvima i geometrijom goriva. Važno je znati duljinu plamena, kako bi se moglo uzeti u obzir širenje požara između vozila. Većina goriva (kruta i tekuća) izgaraju sa svjetlosnim difuzijskim plamenom gdje se otpušta oko 70% ukupne energije kao konvektivna toplina i oko 30% se oslobađa kao zračenje. Neto emisijska snaga plamena ovisi o koncentraciji čestica čađe i debljini plamena [22].

Za većinu ugljikovodičnih goriva, najveći promjer zračenja mjeri se kada je promjer plamena tri metra ili veći, što je također veličina kad vatra optički postane gusta. Dim može apsorbirati velik dio zračenja iz požara ugljikovodika koji okružuju plamen, što rezultira manjim zračenjem u okolinu (Ingason, 2005.) [22].

Najjednostavnija formula za visinu plamena na otvorenom je postavka gdje je h_{free} visina plamena, a Q brzina otpuštanja topline i navedeno vrijedi za osno-simetričnu vatre. U tunelima postoje dva čimbenika koja treba uzeti u obzir za određivanje duljine plamena: prisutnost stropa i ventilacija. Kada je prisutan nezapaljivi strop vodoravno produženje plamena (tzv. h_{hor}), može se povezati s visinom granične vrijednosti plamena (tzv. h_{cut}), kako je to vidljivo na slici 3.



Sl.3. Horizontalna duljina plamena ispod stropa, [22]

Babrauskas je u svojoj studiji još 1980. godine izračunao omjer h_{hor} / h_{cut} za neograničeni vodoravni strop i za hodnik. Omjer je bio 1,5 za neograničeni strop. Za hodnik je utvrđen omjer koji ukazuje na veliku ovisnost te je tako prema mjerenjima po širini hodnika, za hodnik širine 3 m omjer bio 1,81, a za širinu hodnika od 2 m, omjer je bio 2,94. Pod pretpostavkom da se tunnel ponaša slično hodniku, Ingason navodi da će se plamen proširiti duž stropa do vodoravne duljine 1,5 - 3 puta veće od granične visine. Učinak ventilacije se ne uzima u obzir u ovim proračunima [22].

Ovisno o brzini strujanja zraka, utjecaj na duljinu plamena se razlikuje. Visoko uzdužna brzina stvara bolju mješavinu opskrbe kisikom i opskrbom gorivom, čime se povećava učinkovitost izgaranja, što može dovesti do skraćivanja plamena. Pri umjerenim brzinama zraka, povećanje brzine zraka može prouzročiti produljenje plamena, jer se pri malim brzinama hlapljive tvari prije toga moraju proširiti na većem području, pri čemu je dovoljan kisik da omogući potpuno izgaranje [22].

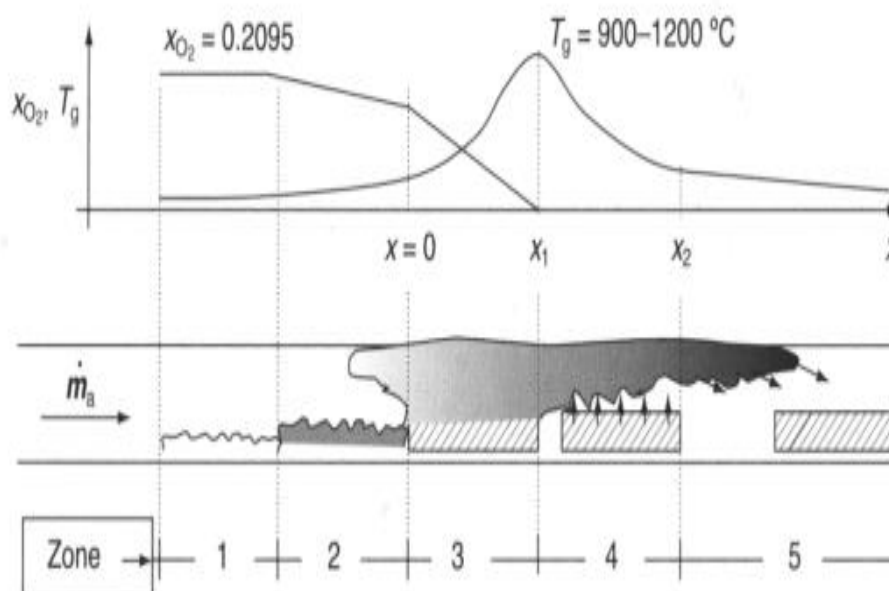
Kod brzina koje su neznatno ispod umjerenog, plamen će opet postati kraći i u većoj će mjeri komunicirati sa stropom tunela, što smanjuje dotok kisika do izvora požara. Kod niže nego umjerenih brzina zraka, plamen će postati manje vodoravan i komunicirat će sa stropom do većeg stupnja, što smanjuje protok kisika u izvor vatre. Kod prisilne ventilacije, gdje je prisutna samo prirodna konvekcija, plamen će udariti u strop i proširiti se u oba smjera [22].

3.4. Situacijska analiza velikih požara u tunelima s velikim uzdužnim protokom zraka

U tunelu u kojem je gustoća vozila velika, a isto je takva i uzdužna ventilacija, požar se potencijalno može proširiti između vozila, te može postati kontroliran ventilacijom. Ingason navodi, na temelju istraživanja de Ris-a o požarima u tunelima iz 1970-ih, da se požari pod nadzorom ventilacije javljaju lakše kad je uski prolaz protoka zraka (ventilacija), te kada je prisutna velika količina goriva, kao i kad je izvor paljenja velik. To ukazuje na to da turbulentno miješanje u zoni izgaranja mora biti dovoljno visoko da potpuno iscrpi opskrbu kisikom, prije nego što vatra postane kontrolirana ventilacijom [22].

To zauzvrat znači da požar u tunelu mora zahvatiti najmanje dva velika vozila s velikim požarnim opterećenjem prije nego što može postati kontroliran ventilacijom [22].

Slika 4 prikazuje shemu požara kontroliranog ventilacijom u tunelu s relativno visokom prisilnom uzdužnom ventilacijom.



Sl.4. Zone gorenja u tunelu s velikom uzdužnom ventilacijom, [22]

Sam postupak gorenja može se smatrati stacionarnim, no za objašnjenje postupka, pet je različitih zona pretpostavljenih na slici 4.

- izgorena zona hlađenja,
- užarena zona žeravice,
- zona izgaranja,
- zona viška goriva i
- zona predgrijavanja.

Zone se dinamično kreću naprijed, pod uvjetom da je gustoća vozila dovoljno velika u području početnog požara. U zoni izgaranja vozila su u potpunosti progutana vatrom i vatreni plinovi su se već ohladili. U zoni užarene žeravice, vozila su prestala gorjeti i nalaze se u kasnoj fazi propadanja, te u naravi predstavljaju doslovno gomilu užarenog žara.

U zoni izgaranja ($x = 0$ na slici 4) vatra u vozilima je potpuno razvijena, a plamteće izgaranje odvija se u cijeloj zoni. Plamen uzrokuje velike brzine prijenosa topline iz plina u gorivo, što dovodi do velike stope isparavanja goriva [22]. Temperatura plinske faze malo iznad $x = 0$ brzo raste i doseže maksimum pri $x = x_1$, gdje razina kisika doseže minimum. Višak zone goriva započinje s $x = x_1$, pri čemu se kisik troši. U ovoj zoni gorivo isparava iz vozila, ali do izgaranja ne dolazi zbog nedostatka kisika. Isparavanje goriva traje do točke gdje temperatura padne ispod temperature pirolize, ($T_{vap} \approx 300 \text{ ° C}$ za većinu čvrstih materijala). Iza ove točke (pri $x = x_2$) ne dolazi do isparavanja, ali plin teče dalje i gubi toplinu do zidova tunela i zagrijava vozila u njemu (zona predgrijavanja) [22].

3.4.1. Požarno opterećenje vozila

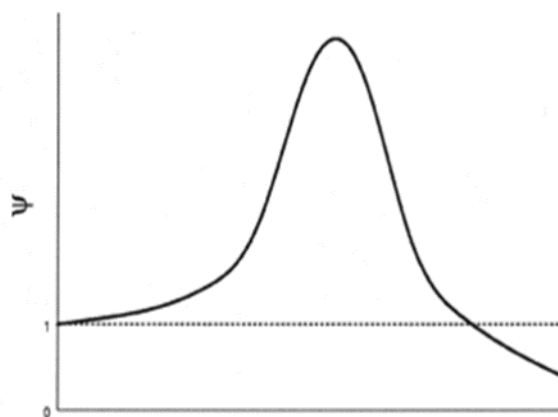
Požarno opterećenje vozila može se procijeniti zbrajanjem požarnog opterećenja svih sastojaka materijala, kako samog kamiona, tako i tereta. Požarno opterećenje (za odjeljak) definirano je kao „Zapaljivi sadržaj po jedinici podne površine“ [22].

Opasnost od požara povezana je s potencijalnom ozbiljnosti požara, te se na taj način može povezati s vatrootpornošću potrebnom za određenu građevinsku komponentu.

Najčešći parametri za opisivanje požara su brzina ispuštanja topline (HRR) i temperatura vatre [22].

Nekoliko je autora primijetilo da požar u tunelu ima puno veći HRR nego što bi se očekivalo od istog požara u neobuzdanim uvjetima. Carvel i suradnici u svojoj studiji iz 2004. godine, proučavali su kako se HRR mijenja s geometrijom tunela i ventilacijom [23]. Sposobnost deskripcije utjecaja geometrije tunela na veličinu požara, definirano je HRR koeficijentom poboljšanja, gdje je Q_{tunnel} HRR vatre u tunelu, a Q_{open} HRR slične vatre na otvorenom. U cilju pronalaženja veze između geometrije tunela i HRR-a, Carvel i suradnici u svojoj studiji iz 2004. godine, koristili su rezultate ispitivanja požara iz različitih vrsta tunela i izvedena s različitim vrstama goriva. Tako je na primjer, ispitivanje požara automobila na otvorenom u Finskoj dalo vrijednosti HRR od 1,5-1,8 MW, dok je ispitivanje požara automobila u tunelu dala HRR vrijednosti između 3,6 i 6 MW. Istoimeni autori nadalje su otkrili da dva čimbenika utječu na faktor poboljšanja, a to su da mala dimenzija požara u usporedbi s dimenzijama tunela znači da ponovno zračenje iz zidova tunela dominira procesom, te da velika dimenzija požara u usporedbi s dimenzijama tunela znači da vjerojatno postoji nedovoljna količina kisika na raspolaganju da vatra izgori pri maksimalnom HRR [23].

Učinak toga je da će se ψ povećavati s dimenzijom vatre do kulminacijske točke, a zatim kad vatra postane kontrolirana ventilacijom i ψ će se smanjivati, kako je vidljivo na slici 5. Položaj maksimalne točke i brzina smanjenja prema nuli ovise o prirodi goriva i geometriji tunela [22].



Sl.5. Varijacija koeficijenta pojačanja s dimenzijom vatre, [22]

Vrijedi spomenuti i to da je HRR teško procijeniti za ispitivanje požara u tunelu čak i uz puni set mjerenja opreme, a za pravi požar još je teže navedeno procijeniti, naročito kad se požar već bio dogodio. Carvel i suradnici međutim navode da je HRR najvažniji čimbenik koji doprinosi jačini požara. Što je veća HRR to je požar jači [22].

4. PRISTUPI OSIGURANJA ZAŠTITE OD POŽARA U TUNELIMA

Cilj ovog poglavlja je odgovoriti na pitanje koji kriteriji ili zahtjevi osiguravaju zadovoljavajuću protupožarnu sigurnost u tunelima. Taj cilj moguće je spoznati detekcijom dviju glavnih komponenti, u prvom redu, koje mjere sigurnost od požara (metode i perspektive) postoje, i drugo, koja je razina prihvatljivi.

4.1. Požarna sigurnost u tunelima

Sigurnost požara u tunelima odnosi se na ograničavanje broja požara i ograničavanje posljedica požara ako se dogodi. Požar može započeti u vozilu, kao posljedica nesreće ili zbog neispravnog rada opreme ili vozila u tunelu. Dvije glavne krajnje posljedice su ljudski životni i ekonomski utjecaji na društvo koji proizlaze iz popravka infrastrukture i smetnje u slučaju zatvaranja [24].

Tuneli su važna infrastruktura koja olakšava komunikaciju između geografskih područja i stoga su neophodni za međugradski prijevoz i razvoj regionalnih gospodarstava. Međutim, nesreće u tunelima i posebno požari, mogu imati dramatične posljedice i mogu se pokazati izuzetno skupima u uvjetima ugroza ljudskog života, povećanog zagađenja, zagađenje i troškova popravka [24].

U EU Direktivi o minimalnim sigurnosnim zahtjevima primarni je cilj sprečavanje kritičnih događaja koji ugrožavaju ljudski život, okoliš i infrastrukturu tunela. Sekundarni je cilj smanjenje mogućih posljedica događaja, kao što su nesreće i požari, kako bi se ljudi mogli spasiti, omogućiti trenutnu intervenciju sudionika u prometu, osigurati učinkovito djelovanje hitnih službi, zaštititi okoliša i ograničiti materijalnu štetu [25].

U EU projektu Požar u tunelima (FIT) najvažnije posljedice su prioritetne kako slijedi: [25]

- Ciljevi koji se odnose na sigurnost života
 - a. smanjiti rizik od ozljeda ili smrti za korisnike tunela,
 - b. smanjiti rizik od ozljeda ili smrti za osobe izvan tunela, i
 - c. minimalizirati rizik od ozljeda ili smrti za hitne službe ili radnike.

- Ciljevi povezani s ekonomskim posljedicama i kvalitetom života
 - a. izbjeći oštećenja koja prijete stabilnosti konstrukcije smanjujući korisnost tunela,
 - b. izbjeći skupe troškove popravka i
 - c. izbjegavajte dugo zatvaranje tunela.

Smatra se da četiri glavna čimbenika utječu na razinu sigurnosti: infrastruktura, rad, vozila i sudionici u prometu [25]. U EU projektu Trajni i pouzdani tunel proučene su i analizirane konstrukcije, opasnosti i posljedice po tunele, te su identificirani su sljedeći kritični događaji ili opasnosti: [25]

- predmet koji je ispao
- zaustavljeno vozilo
- gužva u prometu
- sudar između vozila
- Sудар sa strukturom tunela
- vatra.
- širenje vatre
- eksplozija
- otrovni i agresivni materijali
- poplava
- potres

Očito je potrebno uključiti događaje koji mogu uzrokovati požar jer je jedan od ciljeva uključiti vjerojatnost pojave. Predmet koji je ispao, može dovesti do sudara, koji može pokrenuti požar. Gužve u prometu mogu istodobno dovesti do sudara otežavajući evakuaciju. Stoga se mora uzeti u obzir prvih pet događaja. Očito su događaji koji počinju vatrom također u opsegu ove analize. Međutim događaji kao što su eksplozija, otrovni i agresivni materijali, poplave i potres, neće se rješavati jer je ili malo vjerojatno da će se dogoditi ili zato što se rješavaju kao zasebni slučajevi kroz druge standarde i regulatorne dokumente [25].

4.1.1. Razumijevanje sustava tunel-vozilo-čovjek

Željeni scenarij sustava tunel-vozilo-čovjek scenarij je protoka vozila, koji vozeći se propisnim ograničenjem brzine održavaju sigurnu udaljenost između njih. Svi vozači su na oprezu u takvom prometno informacijskom sustavu [26]. Svi scenariji koji odstupaju od ovog scenarija mogu predstavljati manji ili veći rizik, ne samo za nesreće. Potrebno je usredotočiti se i na druge događaje koji smanjuju sigurnost, te za svaki identificirati rizik i potencijalne barijere. Cilj dizajna trebao bi biti učinkovito funkcioniranje sustava tunel-vozilo-čovjek u cjelini [25].

Organizacija tunela bi u pogledu zaštite od požara trebala počivati na sljedećim principima: [25]

- Scenarij „kako je planirano“: stabilan i siguran protok prometa, sva sigurnosna oprema je u funkciji, dobro je održavana i spremna za upotrebu.
- Za slučaj propadanja sigurnosne opreme ili funkcije: operator tunela treba znati što učiniti i kada tunel mora biti zatvoren ili kada trebaju druge mjere biti poduzete radi osiguranja sigurnosti. Vjerojatnost ove pojave može se smanjiti pravilnim treningom i održavanjem.
- Za slučaj scenarija ispuštenog predmeta: ispušten predmet na cesti, potrebno je obavijestiti vozače u prometu oko njega. Uklonite ga što je prije moguće.
- Za slučaj zaustavljenog vozila: ako se vozilo zaustavilo na cesti ili sa strane ceste. Isto djelovanje kao gore.
- Za slučaj prometne gužve: Kroz upravljanje prometom može se odvijati promet do ograničenja i zagušenja unutar tunela. Također bi trebali biti spremni planovi alternativnih pravaca.
- Za slučaj scenarija nesreće (sudar): Upravljanje incidentima i plan reagiranja u hitnim slučajevima ukazuju na ono što treba učiniti. Pri navedenom potrebno je imati u vidu da se rizik može smanjiti pravilnim upravljanjem prometom i incidentima.
- Za slučaj scenarija požara: Svrha ovog scenarija je smanjiti posljedice požara. Potrebno je zaustaviti ulaz u tunel, olakšati samospašavanje i ugasiti požar već ranije koliko je moguće. Potrebno je vratiti tunel u puni radni status što je brže moguće [25].

Svrha ovih događaja ili scenarija ne smije biti isključiva. Naglašava se isto tako da bi sustav tunel-vozilo-čovjek trebao imati funkcionalnost u vidu integriranog pristupa sigurnosti tunela [25].

4.1.2. Integrirani pristup sigurnosti tunela

U PIARC-ovom izvješću iz 2007. godine pod naslovom „Integrirani pristup sigurnosti tunela“, predstavljen je okvir za holističku sigurnost cestovnog tunela. Kao opći sigurnosni ciljevi ističu se: [27]

- Spriječiti kritične događaje koji mogu ugroziti ljudski život, okoliš i instalacije tunela.
- Smanjiti posljedice nesreća, poput požara, stvaranjem preduvjeta za:
 - a. Ljude koji su sudjelovali u incidentu kako bi se spasili:
 - b. Sudionike u prometu da odmah interveniraju kako bi se spriječile veće posljedice
 - c. Osiguravanje učinkovite akcije hitnih službi
 - d. Zaštitu okoliša i
 - e. Ograničavanje materijalne štete

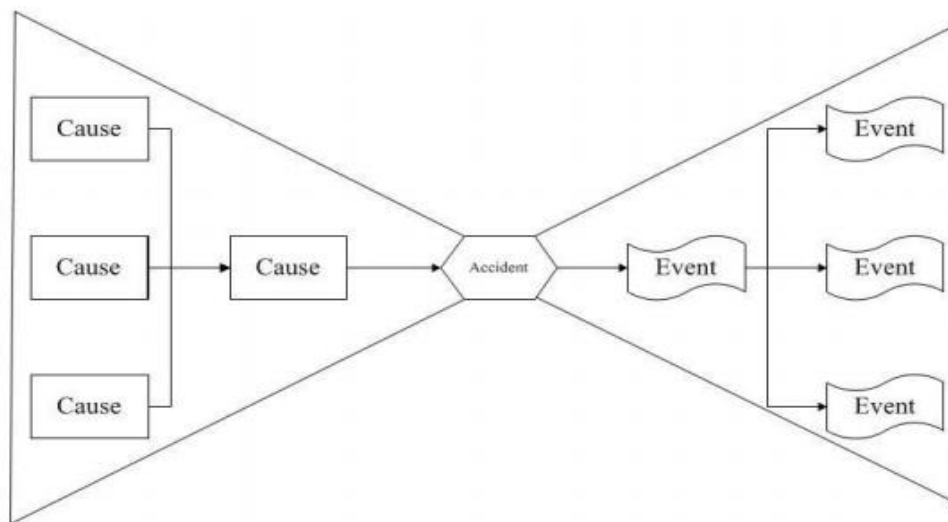
Sigurnost se vidi kroz dvije paradigme: sigurnosni krug, kako je vidljivo na slici 6, i model leptir mašne.



Sl.6. Sigurnosni krug [27]

U bilo kojem cjelovitom sigurnosnom sustavu treba se pozabaviti svim elementima u sigurnosnom krugu. Može biti neučinkovito usredotočiti se samo na jedan ili nekoliko elemenata. Proakcija se odnosi na uklanjanje osnovnih uzroka, na primjer kroz trening ili dizajn. Prevencija se odnosi na smanjenje vjerojatnosti nesreća u tunelima, na primjer smanjenom brzinom. Priprema je rješavanje hitnih slučajeva. Ublažavanje se odnosi na ublažavanje posljedica nesreće u tunelu [27].

Intervencija dolazi od napora spasilačkih timova. Usluga naknadne njege podrazumijeva poduzimanje radnji povratka u normalan rad. Na kraju se evaluacija odnosi na učenje.



SI.7. Model leptir mašne [27]

U modelu leptir mašne obuhvaćene su neke temeljne značajke iz analize rizika. Lijeva kravata predstavlja uzroke koji vode do incidenta, a koji se u analizi rizika često tretiraju pomoću stabla rasjeda. Desna kravata sadrži učinke ili posljedice incidenta. To je često tretirano stablom događaja u analizi rizika. Model leptir-mašne sekvenciran je u vremenu, od lijevo udesno. Strukturiranim modelom leptir-kravate relativno je lako vidjeti kako određeni rizik utječe na sustav i na to kako bi se mogle poduzeti različite mjere za smanjenje bilo vjerojatnosti ili posljedica događaja [27].

Moglo bi biti vrijedno napomenuti da postoje i druge paradigme u vezi s predstavljanjem ili razumijevanjem incidenata kao što su požari u tunelu, pa tako prema epidemiološkim modelima nesreće mogu biti rezultat složene kombinacije čimbenika, pri čemu neki mogu biti očigledni, a neki latentni, koji slučajno postoje u

prostoru i vremenu. Umjesto da razgrađuje sustave na manje dijelove, sustav se može promatrati kao cjelina u kojoj se stvarne funkcije sustava proučavaju na primjer upotrebom modela teorije kaosa.

Očito će sekvencijalni model nesreće vjerojatno rezultirati pronalaženjem specifičnih uzroka. Epidemiološki pristup identificirao bi nositelje i latentne uvjete kao pokazatelje sustava "zdravlje", te bi model zasnovan na modelu leptir mašne pronašao uvjete koji su iz iskustva povezani sa nesrećama [27].

Ključni elementi u okviru integriranog pristupa su: [27]

- Kriteriji razine sigurnosti
- Infrastruktura i operativne mjere
- Socio-ekonomski i kriteriji troškova i koristi
- Tehnike procjene sigurnosti
- Poznavanje korištenja cestovnog tunela
- Faza života u tunelu
- Korištenje operativnog iskustva
- Uvjeti sustava tunela.

Kriteriji razine sigurnosti uključuju jednu ili više sljedećih stavki: minimalna sigurnost, zahtjevi i sigurnosni standardi, sigurnosni procesi koji uključuju sve relevantne dionike, sigurnosni standardi ili vrijednosti za rizik ili sigurnost ili deterministički standardi za relevantne scenarije. Nisu potrebne sve moguće sigurnosne značajke za svaki tunel, već samo značajke potrebne za ispunjavanje sigurnosnih kriterija [27].

Značajke sigurnosti infrastrukture uključuju tehničke sustave i instrumente, geometrijska, te strukturalna rješenja i materijale, koji se koriste u svim dijelovima tunela. Značajke sigurnosti rada uključuju postupke za odgovarajuće upravljanje sigurnošću tunela. Na primjer inspekcija, održavanje i upravljanje prometom. Ostali aspekti su koordinacija dužnosti operatora, posade za održavanje i spasilačkih timova koje treba dobro opisati i povremeno testirati, uključujući i naknadnu brigu i procjenu u sigurnosnom krugu [27].

Direktiva EU-a o sigurnosti tunela zahtijeva analizu rizika. Procjena odgovara na pitanje je li postignuta željena razina sigurnosti.

Procjene sigurnosti dijeli se u dvije skupine. [27]

- Probabilistička procjena sigurnosti, koji bi, na primjer, mogao biti kvantitativni rizik. U model leptir mašne uključene su i desna i lijeva strana. Cilj je sistematično procijeniti i posljedice i vjerojatnosti na holistički način.
- Deterministička procjena sigurnosti, koja bi mogla biti analiza scenarija. U pramcu modela kravate eksplicitno se uzima u obzir samo desna strana, dok se lijeva strana implicitno razmatra u smislu izbora scenarija.

Faza trajanja tunela utječe na detalje sigurnosne analize. Nakon nekog vremena u radu, radno iskustvo može pridonijeti daljnjem poboljšanju sigurnosti i organizaciji.

Stanje tunelskog sustava određuje funkciju. Kako bi se osiguralo, potrebna je propisana funkcija, postupci održavanja i pregleda. Ovo uključuje procjenu sigurnosne degradacije s obzirom na to da je funkcija ugrožena i da treba poduzeti odgovarajuće mjere poput dopunskih mjera ili zatvaranja tunela.

Prijedlog integriranog pristupa sigurnosti ističe različite faze, kao što su planiranje, projektiranje, izgradnja i rad. Analizom sigurnosti na različitim razinama, izvode se različiti ciljevi, ovisno o fazi i sigurnosti tunela, dokumentaciji i organizacijskoj spremnosti na kontinuirana stvarna poboljšanja [27].

4.1.3. Kriteriji razine sigurnosti

Što je prihvatljiv rizik može se izraziti na više načina, bilo kvalitativnim, kvantitativnim ili polukvantitativnim pojmovima. Važno je da su prisutne cjelokupne mjere dobre zastupljenosti zaštite od požara, te postojanje pouzdanih i razumnih metoda za izračunavanje mjera. Svaka mjera može imati kriterij koji određuje prihvatljivu razinu sigurnosti. U EU projektu Nadogradnje postojećih tunela za zaštitu od požara (UPTUN) radnim paketima (WP) 2 i 5, predlažu se kriteriji sigurnosti. U WP 2 predloženi su kriteriji za sigurnost života koji se temelje na učinku: [27]

- vidljivost > 10 m,
- temperatura plina < 60 ° C,
- zračenje < 2 kW / m²
- otrovni plinovi FI < 1 (model Purser).

U WP 5, sukladno UPTUN-u iz 2006.godine, predloženi su kriteriji razine sigurnosti iz cjelovite perspektive.

Ovo uključuje: [27]

- dopušteni rizik u smislu društvenih i individualnih kriterija rizika,
- upravitelj sigurnosti tunela koji je odgovoran za incident, nepredviđene slučajeve, katastrofu i planove održavanja,
- sigurnosne zahtjeve temeljene na učinku u smislu:
 - a. prevencije: Izbjegavajte prometne gužve, prepreke / smetnje i ostalo
 - b. detekcije potencijalnih uzroka nesreće,
 - c. ispravka u smislu ublažavanja posljedica,
 - d. samospašavanja u smislu omogućivanja korisnicima tunela da dođu na sigurno mjesto i
 - e. represije u smislu pružanja informacija hitnim službama.

4.2. Kategorizacija metoda za provjeru prema tretmanu neizvjesnosti

Kao što je nekoliko puta istaknuto u ovom radu, postupak dizajniranja je važan. Važno je provjeriti i potvrditi oba postupka dizajniranja: gradi li se prava stvar i gradi li je se ispravno. Dalje, što se tiče krajnjeg ostvarenja rezultata, prije otvaranja tunela ključno je imati odgovor na pitanje je li tunel dovoljno siguran. Da bi se kategorizirale metode koje se koriste za provjeru, poput analize scenarija, ukratko će biti predstavljen okvir autorice Paté-Cornella. Paté-Cornell u svojoj studiji iz 1996. godine definira šest različitih razina, ovisno o razini nesigurnosti u analizi rizika [28].

4.2.1. Neizvjesnost

Neizvjesnost je dvosmislen pojam s mnogo različitih definicija koje se koriste, te je navedeno potrebno razjasniti. U spomenutoj studiji autorice Paté-Cornella neizvjesnost se smatra temeljnim fenomenom, koji odražava nepotpuno znanje. Za razliku od, na primjer, teorije odlučivanja gdje netko može donijeti odluku sa sigurnošću, trenutni koncept nesigurnosti znači da će uvijek biti neizvjesnosti jer je ljudsko znanje o budućim događajima u praksi, nikad dovršeno. Nesigurnost može biti posljedica slučajnosti, ali može i predstavljati varijacije u uzorcima [28].

Nadalje, to može biti povezano s modelom koji se koristi, pri čemu se može ispitati koliko dobro predstavlja ono što zapravo pokušava modelirati. Vjerojatnost se često koristi za predstavljanje neizvjesnosti. Na primjer raspodjela vjerojatnosti mogla bi predstavljati nesigurnost u određenom parametru. Također bi mogla postojati nesigurnost u pogledu oblika krivulje raspodjele [28].

Morgan i Henrion u svojoj studiji iz 1990. godine, tvrde da samo empirijske veličine predstavljaju svojstva ili stanja svijeta, koja bi trebala bi biti predstavljena raspodjelom vjerojatnosti [28].

4.2.2. Šest razina nesigurnosti

Šest razina koje je predložila autorica Paté-Cornell u svojoj studiji iz 1996. godine, izraženo je u smislu različitog pristupa analizi rizika. Međutim, neizvjesnost je uvijek prisutna, pa kakva se god metoda koristila, od velike je vrijednosti za opisivanje tretmana neizvjesnosti. Šest razina je kako slijedi: [28]

- Razina 0: Otkrivanje opasnosti i prepoznavanje načina kvara.
- Razina 1: Pristup u najgorem slučaju

To može biti opcija ako je najgori slučaj dovoljan za potporu odluci, ali može biti teško odrediti što je „najgore“.

- Razina 2: Vjerojatno najgori slučaj

Ovo može biti opcija ukoliko se želi spoznati o razumnoj vjerojatnoj gornjoj granici, međutim, može biti teško odlučiti što je to vjerovatno najgori slučaj.

- Razina 3: Najbolje procjene i središnja vrijednost.

Ova razina odražava najvjerojatnije ishoda i često se koristi za analizu troškova i koristi (CBA). Budući da ništa ne govori o uključenoj nesigurnosti, nemoguće je predvidjeti vjerojatne fluktuacije.

- Razina 4: Procjena vjerojatnosti za pojedinačnu krivulja rizika

Ova razina odražava izlaz u smislu krivulje vjerojatnosti, koja prikazuje nesigurnost uključenu u ograničenja korištenih metoda i iznesene pretpostavke.

- Razina 5: Analiza vjerojatnosti rizika za više krivulja

Ova opcija uzima u obzir razmatranje konkurentskih modela i pretpostavki. Ovih šest razina ovise o dostupnom znanju i statistikama. U nekim slučajevima nema smisla izvoditi analizu na razini 5, jer možda i nema dostupnih numeričkih modela ili podataka [28].

4.3. Analiza rizika za cestovne tunele

Metode za provjeru sigurnosti mogu se prema nalazu studije iz 2007. godine, autora Bearda i suradnika 2007, okarakterizirati kao bilo jedan i ili kombinacija sljedećih izbora: [29]

- Provjera poštivanja propisanih propisa
- Kvalitativni modeli (temeljeni na znanju, iskustvu ili sustavnim kvalitativnim analizama poput FMEA).
- Kvantitativni modeli
- Fizički modeli ili eksperimentalni testovi
- Teorijski modeli (kao primjerice deterministički modeli u smislu predviđanja zadanih varijabli, kao što je na primjer Newtonov zakon i nedeterministički modeli)
- Probabilistički modeli (predviđanje ishoda)
- Statistički modeli (nema koncepta vjerojatnosti)
- Točkovne sheme

Dvije najčešće metode analize rizika za cestovne tunele karakteriziraju se kao scenarij ili sustav. Pristup zasnovan na scenariju kvalitativan je u načinu odabira jednog ili više scenarija prema iskustvu, znanju ili propisima. To mogu biti kvantitativni ili kvalitativni modeli u smislu analize ishoda odabranog scenarija [29].

Pristup zasnovan na sustavu spada u kategoriju kvantitativnog, nedeterminističkog modela vjerojatnosti, te se naziva kvantitativnom analizom rizika (QRA) [29].

Holistički pristup analizi rizika proučava interakciju između sudionika u prometu, operatera, vozila i infrastrukture. Ovo je razmišljanje temeljeno na idealnom slučaju,

dok u stvarnosti modeli nisu savršeni. Cilj analize rizika je biti proaktivan i predvidjeti buduće događaje [29].

Postupak analize rizika sadrži sljedeće osnovne korake, a to su: definicija sustava, identifikacija opasnosti, analiza vjerojatnosti, analiza posljedica, te procjena rizika [29].

4.3.1. Pristup zasnovan na scenariju

U pristupu temeljenom na scenariju, posljedice za svaki scenarij procjenjuju se prema unaprijed definiranim kriterijima. Frekvencije igraju ulogu samo u odabiru scenarija. Ovaj pristup je vrlo pogodan za analizu događaja ili planiranje hitnog odgovora mjera. Ako je odabran samo jedan scenarij u smislu najgoreg ili najvjerojatnijeg slučaja, ovaj pristup tretira nesigurnosti prema Paté-Cornellovoj razini 1 i razini 2. Ako je analiziran relevantan skup i vjerojatnog i najgoreg scenarija, to može biti prikaz na razini 3 ili blizu razine 4 [28].

Zanimljivo je sagledati nizozemski primjer pristupa zasnovanim na scenariju za cestovne tunele. Cilj nizozemske analize scenarija je testirati dizajn prema utvrđenim ciljevima i zahtjevima sigurnosti. Fokus je na samospašavanju i odgovorima u hitnim slučajevima. [30]

Odabrani scenariji trebaju biti uravnoteženi, realni i vjerojatni. Svaki se scenarij analizira u vremenskim koracima, tj : zaostajanju i prekidu, incidentu, otkrivanju / alarmu, unutarnjoj pomoći u hitnim službama (operater tunela), vanjskoj hitnoj pomoći i na kraju ponovnom otvaranju tunela [30].

Općenito se koriste mekani kriteriji. Rezultat su identificirane moguće slabe točke u sustavu tunela u cjelini i optimizacija upravljanja procesima prije, tijekom i nakon incidenta. Nadalje, opis razvoja scenarija izvrstan je komunikacijski alat [30].

Učestalost scenarija igra ulogu u odluci o dodatnim sigurnosnim mjerama, te se ne provode skupe mjere koje utječu samo na scenarije male vjerojatnosti. Ovaj pristup mogao bi se formulirati kao načelo odluke [30].

Zanimljivo je sagledati i francuski primjer pristupa zasnovanim na provjeri sigurnosti za cestovne tunele. Cilj francuskog modela je osigurati sigurnost sudionicima u

prometu i poboljšati njihove sposobnosti, kako bi se spasili odgovarajućom tunelskom opremom i postupcima [30].

Sljedeći glavni alati koriste se za osiguravanje sigurnosti u cestovnim tunelima: [30]

- Smanjivanje vjerojatnosti nesreće poštivanjem široko prihvaćene prakse
- Ako se ne poštuju propisani standardi, uspoređuje se procjena sigurnosti, kako bi se procijenilo jesu li odstupanja prihvatljiva ili ne
- Navedene su mjere namijenjene smanjenju rizika od nesreća
- Procjenjuje se kvar sustava i komponenata, te odsustvo uobičajenih načina kvara, radi provjere sigurnosne opreme

Glavni alati za provjeru ovoga su sljedeći: [30]

- Kvantitativna procjena frekvencija i pokretački događaji
- Polukvantitativno rangiranje pokretačkih događaja pomoću matrice rizika
- Kvantitativna analiza niza scenarija za procjenu kretanja dima i mogućnost samospašavanja

4.3.2. Pristup zasnovan na sustavu (QRA)

Druga skupina metoda analize rizika temelji se na sustavu, poznatijem kao QRA. Za razliku od pristupa temeljenog na scenariju gdje se odabire nekoliko scenarija, ovdje se u obzir uzimaju svi relevantni scenariji. Oba uzroka incidenata i kvarova u sustavu (lijeva strana modela leptir mašne) i analiza posljedica (desna strana modela leptir mašne) uključena je u analizu. Obično se to radi korištenjem stabala kvarova i stabala događaja. Na ovaj način vrlo zorno može se predstaviti mnogo različitih scenarija. Rezultat je vjerojatnost pojave nezgoda i rezultirajuće posljedice (obično u smislu smrtnih slučajeva). Ovaj se rezultat često prikazuje u vidu individualnog rizika (najveća vjerojatnost za smrtni slučaj pojedinca) i društveni rizik (pokazivanje vjerojatnosti u ovisnosti o broju smrtnih slučajeva).

Međutim, potrebno je imati u vidu da ima relativno malo podataka o incidentima u cestovnim tunelima i još manje informacija o požarima u tunelima. Stope nezgoda variraju između tunela, ovisno o čimbenicima kao što su zemlja, mjesto, geometrija itd. Međutim, u većini slučajeva neizbježno je koristiti općenite podatke zbog čega ispravke, ako je moguće, treba izvršiti [30].

Mnoge zemlje koriste sustavne pristupe, na primjer Nizozemska, Austrija, Švicarska i Norveška. U teoriji zasnovanoj na sustavu, analiza rizika odgovara razini Paté-Cornell 4 [28].

4.4. Ostvarenje protupožarne zaštite u tunelima

U slučaju požara u tunelima, ključno je pravilno upravljati opasnostima, oslonom na napore ublažavanja. Tipični zahtjevi mjera zaštite od požara uključuju sljedeće aspekte: [30]

- Prilagodba površine ceste: površina ceste trebala bi smanjiti isparavanje otrovne tekućine i omogućiti brzo ispuštanje
- Rezervoar za tekućinu i odvod: unutar EU obvezno je imati odvod za zapaljive i otrovne tekućine, gdje je dopušten prijevoz opasnih tvari. Korist je teško procijeniti. Ovo se najbolje može navesti kroz funkcionalni zahtjev.
- Kablovi ispod ceste: oni omogućuju održavanje i servis bez ikakvih radova ometajućih promet. Nadalje, kabeli su u velikoj mjeri zaštićeni od događaja koji se događaju u tunelskoj cijevi. To također povećava dostupnost.
- Poravnanje tunela
- Ručni aparati za gašenje: Oni su neophodni kako bi se olakšao prvi odgovor za sudionike u prometu. Smatra se da je korist velika, a trošak mali. Razmak varira između 50 i 250 m za različite nacionalne smjernice. Potreba i razmak ručnih aparata za gašenje može se propisati s određenim kapacitetom. Nadalje, preporučuje se alarm za uklanjanje aparata.
- Fiksni sustavi za gašenje požara: Sustavi za gašenje požara prilično su skupi, ali oni također imaju veliku korist i visoku učinkovitost u smanjenju razornog potencijala od katastrofalnih požara do manjih požara.

Procjene rizika i troškova i koristi s obzirom na velike katastrofe požara u tunelima, s posljedicama u ekonomskom smislu, te utjecajem na infrastrukturu, kao i vrijeme popravka i zatvaranja, ključ su prikladnosti kod odabira prikladnih metoda. Pri navedenom treba imati u vidu da će za velike i važne tunele koristi vjerojatno nadmašiti troškove

4.4.1. Oprema za otkrivanje i nadzor požara

Analiza sustava koja se koristi za otkrivanje i komunikaciju prilično je teška i općenita, te kao takva nije uključena u QRA ili CBA. Analiza scenarija može biti koristan pristup zajedno s funkcionalnim zahtjevima. Propisani zahtjevi također bi mogli biti korisni i dio su nacionalne legislative. U Hrvatskoj je to Pravilnik o minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele, kao i Zakon o zaštiti od požara.

Potrebno je imati na umu da korist od svakog sustava otkrivanja ovisi o tome jesu li instalirani ostali sustavi za otkrivanje. Tipični zahtjevi za otkrivanje i nadzor požara po pitanju opreme su kako slijedi: [30]

- Sustavi za automatsko otkrivanje požara:

Detekcija dima u tunelima je teška zbog ispuha iz vozila i ventilacije. Otkrivanje topline trebalo bi međutim imati manje lažne uzbune.

- Ručni sustav za otkrivanje požara (tipke alarma)

Ovo je vrlo jeftino i široko prihvaćena sigurnosna oprema. Propisani zahtjevi s razmakom od 50 metara može se koristiti za sve tunele.

- Telefoni za hitne slučajeve

Kao i kod tipki za alarm, ovo se smatra osnovnom i jeftinom instalacijom. Mogu se koristiti preskriptivni zahtjevi jer su osnovni vezani uz montažu. Metoda za procjenu njegove koristi je putem sigurnosnog koncepta.

- CCTV

Televizija zatvorenog kruga (CCTV) mogla bi biti potrebna i za upravljanje prometom i incidentima. Stoga je to možda jeftina ponuda sustava, koja donosi nekoliko poboljšanja.

- Automatsko otkrivanje nezgoda

Analizom podataka nadzora zaustavljenih vozila može se prepoznati sporiji promet kako bi se privukla pažnja operatera [30].

4.4.2. Gašenje požara

Svi alati za gašenje požara interno utječu na njihovu korisnost, tako na primjer ako je instaliran sistem za prskanje, smanjit će se korist od ručnih aparata za gašenje. Stoga je opći koncept svih sustava za gašenje da se mogu smatrati pozitivnom dodanom vrijednošću za sigurnost od požara, pa tako primjerice korist od takve fiksne vode u okviru sistema za prskanje i ručnih aparata ovisi jedna o drugoj [30].

Tipični zahtjevi koji se odnose na gašenje požara uključuju sljedeće aspekte: [30]

- Hitni pristup vatrogascima

Riječ je o pružanju pristupa tunelu za vatrogasce. Općenito se može očekivati da će biti vrlo skupo ispuniti ovaj zahtjev, koristi je teško procijeniti.

- Opskrba vodom i hidranti

Vatrogasni hidranti pod pritiskom imaju veći kapacitet od ručnih aparata za gašenje požara. Međutim, trošak je također veći. Prema EU Direktivi treba imati hidrante najmanje svakih 250 metara za dulje tunele od 500 metara. Međutim, u Švedskoj su zahtjevi najmanje svakih 150 m za novi tunel i 250 m za postojeće tunele.

- Mjesto vatrogasca

Često vatrogasci započinju s radom u relativno kasnoj fazi, zbog čega se koriste isti uređaji za dim i strategija kao i za gašenje požara u kući, zbog čega će možda trebati više vremena da se stigne pripremiti operacija. Korist je teško procijeniti jer su šanse za gašenje ranih požara relativno mali. Poprečni prolaz za spasilačka vozila unutar EU i mreže TEN je obavezan i to za dvocijevne tunele dulje od 1500 metara.

- Zasebna galerija za pristup vozilima za hitne slučajeve

Ovo se općenito ne koristi, te je riječ o neobveznom zahtjevu.

- Utičnice za vatrogasne alate

Ovo se rijetko implementira, jer je korist od takvog sustava teško procijeniti, te se može očekivati da je neznatna [30].

4.4.3. Evakuacija i rizik po život

Ovo se poglavlje odnosi na sigurnost ljudi u slučaju nesreće. Tipični sustavi koji imaju utjecaj na evakuaciju su sljedeći: [29,30]

- Automatski alarmni sustav

Čim se otkrije požar, alarm svijetli i zvuk hitnosti obraća pažnju sudionika u prometu.

- Sustav ventilacije

Sustav ventilacije neophodan je u dužim i kraćim tunelima, kao i tunelima s gustim prometom. Poboljšava uvjete uzvodno i / ili nizvodno od vatre, ovisno o tome kako se koristi i koja je potreba u požaru tunela. Ili se dim može odvoditi kroz poprečnu ventilaciju sustava, ili se dim transportira duž tunela u uzdužnoj ventilaciji sustava.

- Ventilirani putovi za bijeg
- Svjetla u nuždi

Korist ili utjecaj rasvjete u nuždi velika je, te je navedeno razlog zašto se najčešće propisuje u smislu propisanih zahtjeva. To također uključuje natpise za izlaz u nuždi i / ili svjetlo.

- Zvučnici

Ako postoji 24-satni tim za upravljanje prometom, to se ne bi trebalo generirati dodatni trošak. Međutim, prema PIARC-u, komunikacija u tunelu kroz zvučnike vrlo je teška, zbog velike pozadinske buke i loše akustike.

Sustavi radio komunikacije mogli bi biti prilično jeftina opcija, ako postoji 24-satna centrala za upravljanje prometom, koja bi potom mogla uputiti sudionike u prometu što treba učiniti za svaku konkretnu hitnu situaciju.

- Paralelna cijev za bijeg

Ovisno o strukturi tunela, dizajn ovakve paralelne cijevi za bijeg, može biti vrlo jeftin ili skup za korištenje paralelnog bijega putem cijevi. QRA ili analiza scenarija mogu biti prikladne metode za procjenu potreba.

- Presjek u nuždi

Ovisno o tipu konstrukcije tunela, za jednosmjerne tunele može biti jeftino instalirati mnoga vrata za nuždu. U pravilu vrata za slučaj nužde vode do sigurne komore ili sigurnog puta za bijeg. Razmak koji često propisuje hitni prijelaz na putu evakuacije ili sigurnog utočišta varira između 100 m i 500 m. Trošak uvelike varira ovisno o tome kako je tunel dizajniran. Stoga bi se CBA (Cost-Benefit Analysis) mogla koristiti za optimizaciju ovog pitanja ili za iznalaženje načina kako doći do učinkovitog cjelokupnog dizajna, uzimajući u obzir i drugu sigurnost unutar sustava. Ovaj se sustav zato ne preporučuje propisati za sve dizajne tunele. Analiza rizika također može obuhvatiti ovo pitanje, ali neizvjesnosti su prilično velike, kada je u pitanju ljudsko ponašanje prilikom evakuacije tunela.

- Asimetrični otvori

Cilj ove sigurnosne mjere je izbjegavanje dima, na način da izlazi iz jednog otvora tunela u sljedeći.

- Prelazak s hitnom stanicom prije portala tunela

Ova sigurnosna mjera se koristi za hitne službe i obavezna je za duge tunele.

- Hitne šetnice

Ova sigurnosna mjera obavezna je za nove tunele.

- Izgled zida

Ljudsko ponašanje i percepcija sigurnosti u prometu su važni aspekti, ali korist je teško kvantitativno procijeniti.

4.4.4. Konstrukcijska sigurnost

Svrha sljedećih mjera je zaštita konstrukcije od urušavanja i dugih radova popravaka u tunelima, te se ove mjere odnose na: [30]

- Otpornost na požar u strukturi

To se često određuje funkcionalnim zahtjevima, specificirajući požar kao projekt u smislu prediciranja, koje bi obloge i konstrukcije trebale podnijeti kakvo opterećenje. Unutar EU glavna struktura mora osigurati dovoljnu razinu vatrootpornosti kako bi se izbjegao kolaps, koji može imati katastrofalne posljedice. Međutim, korist od

otpornosti na vatru u velikoj mjeri ovisi o drugim instaliranim sustavima kao što je fiksno suzbijanje vatre. To uključuje izolaciju za zaštitu nosive konstrukcije od topline i upotrebu prikladnog betona koji dobro odolijeva vatri.

- Otpornost opreme na vatru

To se često određuje jednostavnim funkcijskim zahtjevima, dok bi krajnju korist moglo biti teško procijeniti.

4.5. Iskustveni sigurnosni poučci u vezi s katastrofalnim požarima u tunelima u prošlosti – analitički pogled

U prošlosti je bilo mnogo većih požara u tunelu. Neki se nazivaju katastrofalnim požarom tunela (CTF), kao što je to na primjer požar u tunelu St. Gotthard 2001. godine [31]. U stvari, postoje CTF-ovi tijekom posljednjih godina koji su pokrenuli raspravu u Europi o korištenju FFFS-a u cestovnim tunelima. FFFS zaustavlja širenje požara što može spasiti ljude zarobljene u blizini nesreće. Požari se često javljaju u vozilima zbog mehaničkih ili električnih problema. FFFS je skraćeni naziv za Fiksni sustavi za gašenje požara i definiran je od strane PIARC-a za cestovne tuneli, kao

... Vatrogasna oprema trajno pričvršćena na tunel, koja se sastoji od cjevovodnog sustava s fiksnom opskrbom vodom ili sredstvom za gašenje koji kad upravljani imaju namijenjeni učinak smanjenja otpuštanja topline i brzine rasta požara, ispuštanjem vodenog sredstva za gašenje izravno u vatru. Primjeri fiksnih sustava za gašenje požara uključuju sustave za prskanje, poplavu i maglu [32].

Najprirodniji izbor FFFS-a u cestovnim tunelima su oni koji se temelje na vodi., te uključuju tradicionalne prskalice / raspršivače vode, sustavi vodene magle i FFFS s dodanim pjenom.

Kod požara u tunelu St. Gotthard 2001. godine, izvor vatre bilo je gorivo na cesti iz jednog od teretnih vozila koja su sudjelovala u sudaru i njegov puknuti spremnik za gorivo. To je gorivo isparilo uslijed vrućine raznih vrućih dijelova na motoru i bilo je zapaljeno električnim iskrama zbog uzrokovanog kratkog spoja sudarom [32].

Otpriblike u jednoj minuti širenjem požara zahvaćena su oba teretna vozila, što je izazvalo visoki HRR (Stopa ispuštanja topline), koji se usprkos brznoj intervenciji vatrogasaca proširio na dodatnih pet teretnih vozila, dok je daljnje širenje zaustavila vatrogasna postrojba na sjeveru tunela [32].

Male eksplozije uzrokovane su pucanjem guma tijekom požara zbog visokog HRR-a. Veća eksplozija se dogodila nakon otprilike 30 minuta od početka gašenja požara, te je nastala puknućem gotovo praznog spremnika za gorivo jednog od vatrom zahvaćenih teretnih vozila.

Učenje o požarima u tunelu proučavanjem stvarne istrage nesreće donosi vrijedne poučke. Tunel St. Gotthard nalazi se u švicarskim Alpama i sastoji se od jednog kolnika s dva prometna traka, koji idu duž osi sjever-jug. Ujutro, 24. listopada 2001. godine, belgijsko teretno vozilo, koje je putovalo prema sjeveru naletjelo je na zid s njegove desne strane, što je uzrokovalo da HGV preleti na trak prema jugu gdje se sudarilo s lijevim zidom. Nakon toga HGV je skrenuo natrag i napokon se zaustavio nasred ceste. Još jedan talijanski HGV putujući sjevernom trakom pokušao je izbjeći sudar s belgijskim HGV-om. Dva terenska vozila sudarila su se međusobno 1,2 km od juga izlaza tunela. U roku od minute nakon sudara, izbio je požar na jednom od teretnih vozila, a uskoro i na dva [32].

Teretna vozila bila su pod jakom vatrom. Vozač talijanskog HGV-a podigao je alarm i uputio nadolazeći promet s juga za okretanje natrag. Sjeverno od požara nalazila se linija teretnih vozila, koja je prestala kad se dogodio sudar. Ventilacija u tunelu izazvala je dim, te je znatna vrućina putovala prema sjeveru što je zauzvrat širilo vatru na ova teretna vozila jedan po jedan. Zbog brze akcije vozača vatrogasna postrojba koja je dolazila s juga bila je na mjestu događaja u roku od sedam minuta, ali vrućina je bila toliko jaka da nisu mogli doći na 15-20 metara od izgaranja vozila. Gašenje požara također je bilo zabranjeno zbog eksplozije koja je protresla vatrogasno vozilo,

otprilike pola sata nakon početka gašenja požara. Vatrogasna postrojba na sjevernom dijelu tunela bila je ozbiljno ometana u njihovom radu zbog širenja požara u njihovom smjeru i dolazećih otrovnih plinova i dima [32].

Nakon izgaranja vatre pronađeno je 11 tijela sjeverno od mjesta nesreće. Vatra je gorjela oko 24 sata [32].

Tijekom istrage požara doneseni su sljedeći zaključci: Izvor požara bilo je gorivo na kolniku iz jednog od teretnih vozila koja su sudjelovala u sudaru i njegov puknuti spremnik za gorivo. To je gorivo isparilo uslijed vrućine raznih vrućih dijelova na motoru i bilo je zapaljeno električnim iskrama, zbog uzrokovanog kratkog spoja sudarom.

Sljedeći zaključci temelje se na analizi ovog katastrofalnog požara:

- Ne smije se pretpostaviti da FFFS gasi požar u tunelu. Ovaj sustav samo pomaže vatrogascima da dođu do pristupa izvoru vatre suzbijanjem ili kontrolom HRR
- FFFS i ventilacijski sustav tunela trebaju biti dizajnirani da nadopunjuju jedan drugog, što se tiče smjera širenja požara, širenja požara općenito i širenje dima i otrovnih plinova
- Očekuje se da će sloj dima doći do dna tunela na relativno kratkoj udaljenosti od izvora požara. To vrijedi čak i ako se FFFS koristi ili ne koristi.
- Vrijeme aktiviranja FFFS-a treba se temeljiti na analizi rizika, a FFFS-om treba upravljati stručnjak iz upravljačke sobe
- Korištenje FFFS-a može smanjiti troškove popravljivanja zbog mogućnosti FFFS-a da zadrži HRR na donjoj granici, što zauzvrat donosi manje štete uzrokovane toplinom i izgaranjem. Ovo će zauzvrat smanjiti vrijeme zatvaranja tunela zbog popravaka i
- FFFS zaustavlja širenje požara što može spasiti ljude zarobljene u blizini nesreće.
- Požari se često javljaju u vozilima zbog mehaničkih ili električnih problema. Požari zbog izlivanja goriva prilično su rijetki, no prijevoz opasne robe u cestovnim tunelima treba procijeniti i ograničiti.
- Kada se koriste prskalice ili sustavi za raspršivanje vode, poželjne su manje veličine kapljica za sanaciju požara, jer će ohladiti vatru bez rizika od prskanja u tekućem gorivu ili širenja gorućeg goriva na druga područja [32].

5. ANALIZA POŽARA U TUNELU TAUERN

Požar u tunelu Tauern dogodio se u subotu, 11. listopada 2008. godine u području gorja Niske Ture, oko 12:55 sati. Grčki vozač svojim vozilom sa prikolicom krenuo je autocestom A10 u smjeru Salzburga. Teret koji je prevozio bio je grožđe. Zbog tehničke greške došlo je do pojave požara na 83,67 kilometara u tunelu i više nije mogao izvesti vozilo izvan tunela. Kada se pojavio požar vozač je napustio vozilo i pokušao je ugasiti vatru pomoću protupožarnog aparata. Nažalost nije uspio ugasiti vatru i vatra je zahvatila cijelo vozilo i prikolicu. Zbog djelovanja dimnih dojavljča u tunelu Tauern oba su ulaza po nastanku požara stavljena u stanje „crveno“. Vozači koji su se našli u tunelu uspjeli su neozljeđeno napustiti tunel. Došlo je do uzbunjivanja vatrogasaca na sjevernom i južnom dijelu tunela. U 12:59 vatrogasci sa južnog ulaza već su napustili vatrogasnu postaju sa vozilom za spašavanje, sljedila su ih još dva vatrogasna vozila. Vozilom su se približili na oko 150 m ispred mjesta događaja. Zbog snažnog dima i nepoznatog tereta na vozilu nije bilo moguće daljnje napredovanje. Kada je uslijedio dogovor s nadzornom središnjicom vatrogasci iz Zderhousa (južnog dijela) izvukli su vozilo iz tunela u smjeru južnog dijela i tamo su čekali u stanju pripravnosti daljni razvoj događaja. Također vatrogasci sa postajom u Pongau, sjeverno od tunela u 13:01 napustili su postaju i krenuli u smjeru mjesta događaja vozilima. Zabrinutost su izazvale eksplozije koje su se čule iz smjera mjesta događaja. Nadzorna središnjica obavijestila je operativne snage da sustav za usisivanje dima dobro radi i da je moguće napredovanje sa sjevera sve do mjesta požara. Sa udaljenosti od 20 m počelo je suzbijanje požara vodenim bacačem, kako bi se smanjilo isijavanje topline. Krenulo se je i sa gašenjem pomoći četiri c- cijevi, jedne cijevi za pjenu i B- cijevi. Također na mjesto događaja pozvane su okružna vozila i postrojba sa maskama za zaštitu disanja. Ukupno u akciji je sudjelovalo 21 vatrogasac sa uređajem za zaštitu disanja. Opskrba vodom bila je osigurana iz dva hidranta. Jedan se nalazio samo oko 20 m udaljenosti od zapaljenog vozila. Prijetnju je predstavljalo otpadanje žbuke sa stijena tunela zbog razvoja velike vrućine i pukotine zamijećene na stropu tunela. Akcija gašenja trajala je oko jedan sat zbog snažnog razvoja požara, prije nego je stavljen pod nadzor. Požar je stavljen pod nadzor oko 15:30, ali još uvijek su tu i tamo izbijala manja ishodišta požara. Izvlačenje olupine vozila izvedeno je uz pomoć privatnog poduzeća za vuču vozila.

Mjesto požara pregledali su predstavnici sa statičarom. Ustanovljena su oštećenja kablskih vodova na stropu tunela, zbog toga nije bilo moguće trenutno otvaranje tunela. Tunel je stavljen u promet u nedjelju nakon popravka i čišćenja. Do tad se promet odvijao obilaznim prometnicama.

6. ZAKLJUČAK

Iako su svi tuneli ili podzemne građevine jedinstveni, širom svijeta razvijeni su brojni standardi i propisi za usmjeravanje dizajna kako bi se osigurala požarna sigurnost. U teoriji, učestalost požara u tunelima povezana je s varijablama kao što su duljina tunela, gustoća prometa, kontrola brzine i nagib ceste. Stoga se svaki faktor utjecaja mora uzeti u obzir prilikom usporedbe različiti tunela.

Sigurnost požara u tunelima vrlo je važno pitanje jer se mnogi tuneli grade širom svijeta. Iako je rizik od značajnijeg požara u cestovnim tunelima nizak, još uvijek je moguć. Podzemni incidenti požara razlikuju se od požara koji se događaju na površini. Zapravo, kad se požar dogodi u podzemnom prostoru, dolazi do nesavršenog izgaranja zbog nedostatka kisika koji proizvodi veće količine dima i otrovnih plinova. Budući da se to događa u zatvorenom prostoru, ograničena je sposobnost uklanjanja topline i dima, a temperature se brže povećavaju u podzemnim prostorima. Rute za bijeg također mogu biti uske, dugačke i ograničene vidljivosti zbog dima. To povećava ovisnost o nužnom osvjetljenju i znakovima evakuacije. Uz to, vatrogascima je teško prosuditi razmjere požara u zatvorenom prostoru. To znači da je ublažavanje požara tijekom faze projektiranja od vitalne važnosti. Jedan od najvećih požara u podzemlju bio je požar tunela Mont Blanc 1999. godine. Postao je katalizator za poboljšanje zaštite od požara u podzemnim objektima, a posebno u tunelima. Ovaj požar je prouzročilo gubitak 39 života i veliku štetu na strukturi i opremi tunela. Tada je ugašen na 3 godine. Iako je ovaj požar povezan sa nesrećom, neki požari su namjerno podmetnuti. Vatra je također uzrokovala veliku štetu na brojnim tunelima, npr. Tunelu Gotthard u Švicarskoj, gdje je u požaru u listopadu 2001. godine smrtno stradalo 11 osoba. Ove velike požarne katastrofe, opisuju sve veću upotrebu terenskog modela kao atraktivno održivog alata u istraživanju požara u tunelima.

Logično je pretpostaviti da je budućnost sve veći broj vozila i tunela, te da će se povećavati broj požara u tunelima. Nadalje, također je logično pretpostaviti da sve veća složenost tunela, u smislu duljine i broja prometnih trakova može pogoršati požarne scenarije. Ponovo je probuđen interes za FFFS za cestovne tunele, posebno u Europi zbog požara katastrofalnih razmjera u nekim od glavnih tunela, što

je povećalo broj studija u ovom području. Zemlje poput Japana i Australije koja su primjenjivale FFFS u cestovnim tunelima mnogo dulje vrijeme od ostatka svijeta mogu puno doprinijeti provedbi u Europi i drugim zemljama, te mogu biti od velike pomoći pridonoseći svojim iskustvu onome što su naučili u stvarnim situacijama i što očekivati od FFFS-a. Unatoč činjenici da ove zemlje imaju dobar start u odnosu na ostatak svijeta, postoje neki predmeti koje treba dalje proučavati i pitanja na koja treba bolje odgovoriti. Kombiniranu uporabu ventilacijskog sustava i FFFS-a treba dalje proučavati. Posebno u vezi s tim koji tip ventilacije bi bilo najbolje koristiti zajedno s FFFS-om, odnosno da li uzdužnu, poprečnu ili polu-poprečnu ventilaciju.

Požari u tunelima ozbiljniji su od požara u petrokemijskoj industriji ili onima u primjerice zgradama. Stoga su razvijeni ozbiljniji scenariji požara koji simuliraju veće brzine gorenja i veće maksimalne temperature. U inženjerstvu zaštite od požara u tunelima, dobro razumijevanje dinamike požara prije nego do istog dođe, presudno je za pružanje znanstvenih podataka za projektiranje funkcionalnih vatrogasnih sustava.

7. LITERATURA

1. Kirin, S., Ivančić, Z.: Izvori požarne opasnosti, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2010.
2. Larsson, K. Fires in tunnels and their effect on rock - a review, RESEARCH REPORT, (2006), dostupno na: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:996745/FULLTEXT01.pdf>, pristup 19.3.2021
3. Colella, F. Multiscale Modelling of Tunnel Ventilation Flows and Fires (2010), dostupno na: <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/3528>, pristupljeno 18.3.2021
4. Hugosson, J. et al., Requirements and verification methods of tunnel safety and design, Fire Technology SP Report 2012:26, dostupno na: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962688/FULLTEXT01.pdf>, pristupljeno 19.3.2021
5. Guide for tunnelling, Safe work Australia, November 2013, dostupno na: <https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1702/guide-tunnelling.pdf>, pristupljeno 19.3.2021
6. Lönnermark, A. et al., Full-scale fire tests with a commuter train in a tunnel, Fire Technology SP Report : 2012:05, dostupno na: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962670/FULLTEXT01.pdf>, pristupljeno 20.3.2021
7. Zelenika
8. Connor, C.; Tunnel fires – why they are vulnerable and the possible solution; 2017; dostupno na: <https://ifpmag.mdmpublishing.com/tunnel-fires-why-they-are-vulnerable-and-the-possible-solution/>, pristup 22.3.2021
9. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 7. 4. 2021. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49896>>.
10. <http://bonpet.ifixit.hr/klasifikacija-pozara/>, pristup 23.3.2021
11. Pichler, T., : Klasifikacija podnih obloga prema reakciji na požar, SIGURNOST 54 (1) 37 - 44 (2012)
12. Zakon o zaštiti od požara, NN 92/2010
13. Dizdar, J. i Ahac, S., Nevidljive infrastrukturne građevine, Građevinar 5/2017; dostupno na: <http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-69-2017-5-7-Zanimljivosti.pdf>, pristup 8.2.2021
14. Mcdonald, M., Appendix 2.2 Tunnel Construction Methods, 2017., dostupno na: https://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_1852010/EIA/PDF/Appendices/2%20Project%20Description/Appendix%202.2%20Tunnel%20Construction%20Methods.pdf, pristup 8.2.2021

15. Wang, J.N. i Munfakh, G.A., Seismic design of tunnels, 2001., dostupno na:
<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/ERES01/ERES01055FU.pdf>,
pristup 9.2.2021
16. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2009, Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements, dostupno na:
https://www.fhwa.dot.gov/bridge/Tunnel/pubs/nhi09010/tunnel_manual.pdf, pristup 16.2.2021
17. Gehandler, J., Fire safety design of road tunnels, February 2020, dostupno na:
https://www.researchgate.net/publication/339091573_Fire_safety_design_of_road_tunnels, pristup 17.2.2021
18. Lundin, J., Safety in case of fire : the effect of changing regulations. Lund, Department of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, 2005, dostupno na: <https://lup.lub.lu.se/search/ws/files/4793881/26604.pdf>, pristup 24.2.2021
19. Babrauskas, V. et al., RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment, 2010, dostupno na:
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.591.6780&rep=rep1&type=pdf> , pristup 25.2.2021
20. Alvarez, A. et al., Twenty years of performance-based fire protection design: challenges faced and a look ahead, 2013, dostupno na:
http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/SFPE/93e7d31c-6432-4991-b440-97a413556197/UploadedImages/jfpe_2013_4_1.pdf, pristup 26.2.2021
21. Bjelland, H., Treatment of uncertainty in risk assessments in the Rogfast road tunnel project, Safety Science Volume 55, June 2013, Pages 34-44, dostupno na:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092575351300009X>, pristup 27.2.2021
22. Oswald Carvel, R., Fire sizes in tunnels, 2004, dostupno na:
<https://era.ed.ac.uk/bitstream/id/3539/license.txt/>, pristup 28.2.2021
23. Ingason, H., Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels October 2005 Fire Safety Journal 40(7):646-668, dostupno na:
https://www.researchgate.net/publication/223302460_Heat_release_rates_from_heavy_goods_vehicle_trailer_fires_in_tunnels, pristup 01.03.2021
24. Carvel, R. O. et al., 2004, The Influence of Tunnel Geometry and Ventilation on the Heat Release Rate of a Fire. Fire Technology vol 40, pp 5-26; dostupno na:
<https://link.springer.com/article/10.1023/B:FIRE.0000003313.97677.c5>, pristup 02.03.2021

25. Beard, A.N., Fire safety in tunnels, Fire Safety Journal, 2009., dostupno na: <https://researchportal.hw.ac.uk/en/publications/fire-safety-in-tunnels>, pristup 03.03.2021
26. Ntzeremes, P., Evaluating the role of risk assessment for road tunnel fire safety: A comparative review within the EU, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) Volume 6, Issue 3, June 2019, Pages 282-296, dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756418303301>, pristup 04.03.2021
27. Schubert, M. et al., Risk Assessment of Road Tunnels using Bayesian Networks, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 48, 2012, Pages 2697-2706
28. Hugosson, J. et al., Requirements and verification methods of tunnel safety and design, Fire Technology SP Report 2012:26; dostupno na: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962688/FULLTEXT01.pdf>, pristup 04.03.2021
29. Paté-Cornell, E., Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. Reliability Engineering and System Safety, 54, 95-111., dostupno na: <https://www.ccee.ncsu.edu/wp-content/uploads/2015/12/pate.pdf>, pristup 08.03.2021
30. Beard, A.N. et al., Tunnel safety, risk assessment and decision-making, January 2010, Tunnelling and Underground Space Technology 25(1):91-94, dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/245210522_Tunnel_safety_risk_assessment_and_decision-making, pristup 14.03.2021
31. Petelin, S., Risk Analysis Methodology for Road Tunnels and Alternative Routes, January 2010, Strojinski Vestnik 56(1), dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/240625755_Risk_Analysis_Methodology_for_Road_Tunnels_and_Alternative_Routes, pristup 15.03.2021
32. Ingason, H., Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, 20–21 November 2003, dostupno na: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962271/FULLTEXT01.pdf>, pristup 18.03.2021
33. Häggkvist, A., Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels, 2009., dostupno na: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1026115/FULLTEXT01.pdf>, pristup 19.03.2021

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Shema raslojavanja dima..... | 13 |
| Slika 2. Stratifikacija temperature..... | 14 |
| Slika 3. Horizontalna duljina plamena ispod stropa..... | 16 |
| Slika 4. Zone gorenja u tunelu s velikom uzdužnom ventilacijom..... | 17 |
| Slika 5. Varijacija koficijenta pojačanja s dimenzijom vatre..... | 19 |
| Slika 6. Sigurnosni krug..... | 24 |
| Slika 7. Model leptir mašne..... | 25 |