

# ZAŠTITA OD POŽARA U TUNELIMA

---

Šepović, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:128:170942>

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

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



**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

Dominik Šepović

# **ZAŠTITA OD POŽARA U TUNELIMA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2022.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department

Professional undergraduate study of Safety and Protection

Dominik Šepović

# **FIRE PROTECTION IN TUNNELS**

Final paper

Karlovac, 2022

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite

Stručni studij sigurnosti i zaštite

Dominik Šepović

# **ZAŠTITA OD POŽARA U TUNELIMA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Dr. Sc. Zvonimir Matusinović

Karlovac, 2022.

## I. 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:.....  
(označiti)

Usmjerenje:.....Karlovac, .....

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student:..... Matični broj:.....

Naslov:.....

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:  
obrane:

Predviđeni datum

.....  
Mentor:

.....  
Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## II. PREDGOVOR

Izjavljujem da sam ovaj rad napisao samostalno uz stručne smjernice svog mentora dr.sc. Zvonimira Matusinovića kojem se ovim putem želim zahvaliti na trudu, uloženom vremenu i pomoći.

Želio bih se zahvaliti i svim profesorima Veleučilišta u Karlovcu na uloženom trudu da nam prenesu svoje znanje koje i ja danas posjedujem.

Zahvaljujem se i svojim roditeljima koji su mi omogućili i pomogli pri studiranju na Veleučilištu u Karlovcu.

Dominik Šepović

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. PROBLEMATIKA VATROGASNIH INTERVENCIJA .....	3
2.1. Pojam .....	3
2.2. Pripremljenost vatrogasaca .....	6
2.3. Pojam vatrogasca .....	8
2.4. Dužnosti vatrogasaca .....	9
2.5. Organizacija gašenja požara .....	12
3. PROBLEMATIKA GAŠENJA U TUNELIMA .....	14
3.1. Uloga tunela u današnjem načinu življenja .....	14
3.2. Složenost požara u tunelu .....	15
3.3. Modeli tunelskih požara .....	16
3.4. Proces požara u tunelu .....	17
4. SLOŽENOST GAŠENJA U TUNELU .....	19
4.1. Koncept građe tunela .....	19
4.2. Požarna sigurnost u tunelu .....	21
4.3. Sustavi za otkrivanje požara u tunelu .....	22
4.4. Simulacijski modeli .....	23
5. ZAKLJUČAK .....	26
LITERATURA .....	28

## 1. UVOD

U ovom radu će se prikazati složenost gašenja požara u tunelima. Razvoj tehnologije, urbanizacija gradova i mjesta, razvoj infrastrukture i industrije u cjelini, osim svega pozitivnog za razvoj društva, sa sobom nosi i veću opasnost od požara i eksplozija. Sama ta činjenica zahtijeva da se, uz razvoj gospodarstva, infrastrukture, uvođenje različitih tehnologija i sustava, izgradnju poslovnih objekata visokogradnje, poduzmu odgovarajuće mjere zaštite od požara i eksplozija. Sve veća potreba za iskoristivost prostora na zemlji u svakodnevnom funkcioniranju natjerala je ljude da izgrađuju tunele koji predstavljaju sigurnosni problem kada je riječ o požaru jer nije isto kada je požar na otvorenom ili u zatvorenim prostorima.

Danas se grade vrlo skupi objekti, kao i objekti velikih dimenzija u kojima živi, radi ili je privremeno smješten veliki broj ljudi. U takvim objektima potrebne su posebne sigurnosne mjere u svakom pogledu, kako bi se zaštitili životi ljudi i materijalna dobra. Izgradnja visokogradnje u graditeljstvu donijela je poseban problem u zaštiti od požara, kako sa stajališta prevencije, tako i sa stajališta represije, odnosno gašenja i spašavanja.

Razvoj graditeljstva ogleđa se u stalnom iznalaženju novih i smjelijih rješenja u primjeni konstrukcija i novih materijala. Napredak postignut u tom smjeru, međutim, nije u jednakoj mjeri popraćen napretkom u području zaštite od požara zgrada. Izgradnjom novih visokih poslovnih objekata dolazi do velike koncentracije materijalnih dobara i ljudi u relativno malim prostorima, što potencijalno predstavlja veliku opasnost od požara i mogućnost da u kratkom vremenu eventualni požar uništi zgrade i materijalnih dobara koja se u njoj nalaze, kao i dovesti u opasnost živote ljudi koji u njima rade ili žive.

S veličinom i cijenom objekta, kao i brojem ljudi, povećava se rizik od nesreća, a time i rizik od povećanog broja žrtava i materijalne štete. Zato se s veličinom objekta i velikim brojem ljudi koji u njemu rade, žive ili su privremeno smješteni povećavaju mjere opreza i mjere zaštite od požara, eksplozija i nesreća. Pojave poput požara, eksplozija, kvarova i slično mogu uzrokovati ljudske žrtve i materijalnu štetu jednaku elementarnoj nepogodi na određenom području.

Nesreća koja uključuje požar u tunelu zahtijeva brzu i pravilnu reakciju. Prikladno ponašanje proslijeđeno je u obliku informativne brošure i virtualne obuke prethodni tjedan. Smatra se da je posebno važno da se vozilo napusti što je prije moguće, da se pozove pomoć (npr. putem telefona za hitne slučajeve), a zatim da se koristi izlaz za slučaj nužde da se stigne na sigurno.



Ponašanje testnih osoba, koje nisu bile unaprijed svjesne što ih čeka u tunelu, analizirano je u početnom koraku, na temelju protokola promatranja i video zapisa s obzirom na željeni način ponašanja.

## 2. PROBLEMATIKA VATROGASNIH INTERVENCIJA

### 2.1. Pojam

Vatrogasna intervencija započinje dojavom u vatrogasni operativni centar i završava kada se zadnji tim (posada i vozilo) vrati u sjedište postrojbe. Vatrogasni događaj je inicijalni događaj koji se dogodio u neko određeno vrijeme i na nekom određenom mjestu, a u kojem su sudjelovale vatrogasne snage.[1]

Primarni cilj vatrogastva je gašenje požara radi zaštite života i imovine. Dok se ovaj osnovni cilj civilu može činiti jasnim, taktike koje koristi vatrogasna postrojba za postizanje ovog cilja mogu se znatno razlikovati. Na temelju sve većeg broja dokaza, mnoge vatrogasne službe naglašavaju potrebu da se što prije nanese voda na vatru kako bi se poboljšali uvjeti unutar strukture.

Iako postoji mnogo mogućih načina za postizanje brze primjene vode, posljednjih se godina raspravljalo o dva različita pristupa. Jedan takav pristup često se naziva "prijelazni napad" u kojem vatrogasci nanose vodu kroz prozor kako bi u početku suzbili vatru prije nego što uđu u zgradu kako bi potpuno ugasili vatru i osigurali da se vatra više ne širi.

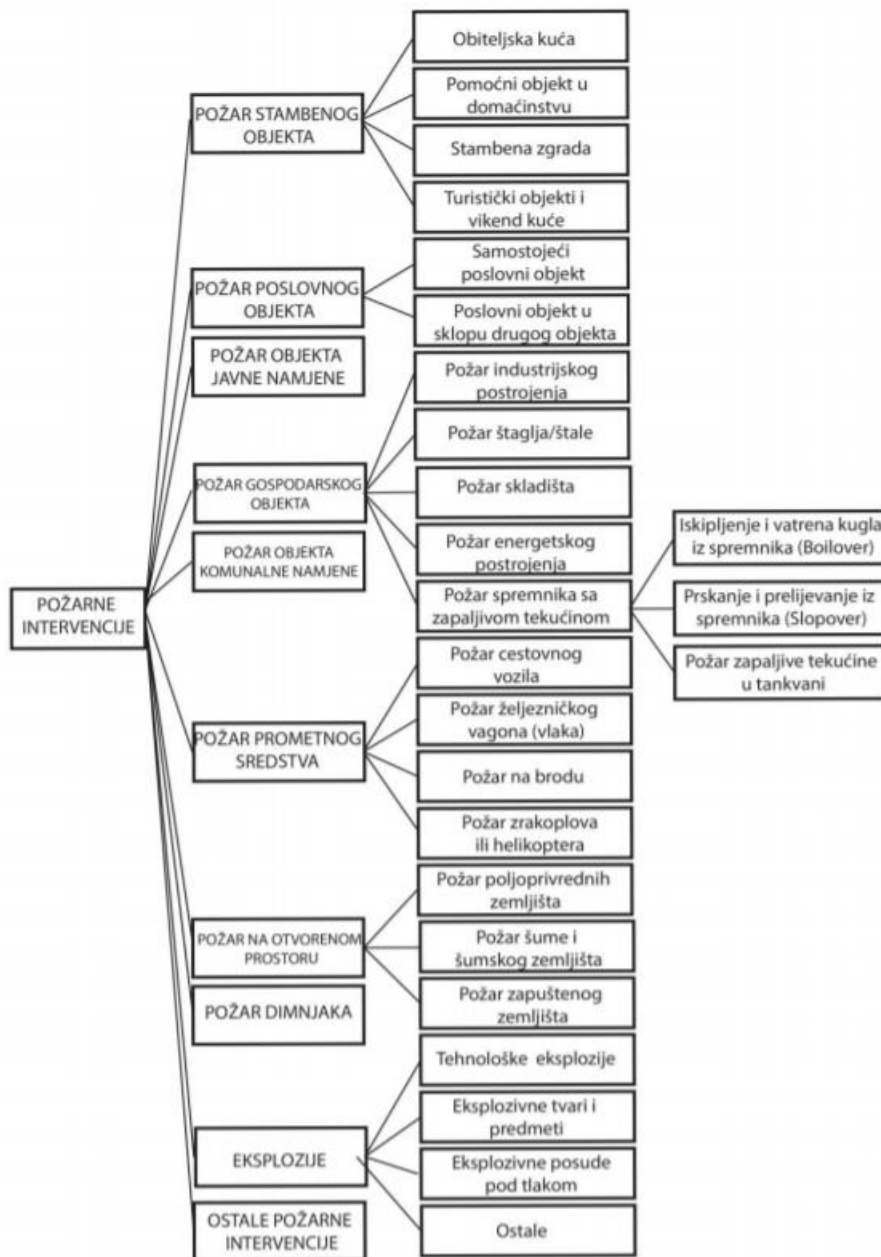
Ovaj pristup je u suprotnosti s metodom "unutarnjeg napada" koju su mnogi vatrogasci učili, a to je da je najbolje u početku ući u kuću kroz ulazna vrata s napunjenim crijevom. Cilj ovog unutarnjeg vatrenog napada je pronaći žarište požara i ugasiti ga što prije kako bi se zaštitili potencijalni stanari.

Lociranje žarišta požara s vanjske strane građevine može biti izazovno ako se ne ventilira kroz prozore odjeljaka, ali može se primijeniti nekoliko tehnika povećanja kako bi se vatrogascima i vatrogasnim službenicima omogućilo da usmjere svoje napore na brzo suzbijanje koordinirano s ventilacijom i pretragom i operacije spašavanja.

Važan aspekt procesa donošenja odluka u određivanju jedne tehnike suzbijanja naspram druge je kako primjena takve taktike može utjecati na održivost zarobljenih putnika. Nekoliko prethodnih studija ispitalo je učinkovitost i učinkovitost vatrogasnih taktika.

Svaka od ovih studija bila je usmjerena na specifičnu taktiku vatrogasne službe i simulirala je te taktike na kontrolirani način kako bi se ispitao utjecaj na okolinu požara. Godine 2017. ispitivali su utjecaj prijelaznog napada vatrogasaca na stanare tijekom niza eksperimenata s vertikalnom ventilacijom.

Slika 1. Prikaz tipizacije



Izvor: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka:1173/preview>

Zaključili su da je prijelazni napad uspio smanjiti toplinsku frakcijsku efektivnu stopu (FER) za 1/5 u geometriji doma na ranču 60 s nakon primjene vode. Nisu ispitali unutarnji napad i nisu mogli procijeniti utjecaj supresije na izloženost otrovnim plinovima i FER. Ova se studija

nadovezuje na prethodna izvješća uključivanjem i unutarnjih napada i mjerenja toksičnih plinova.[4]

Važno je da ova studija koristi vatrogasce za obavljanje zadataka, uključujući više operacija i više vatrogasnih timova kao što bi se dogodilo u tipičnim operacijama na požarištu. Dodatno, ugradnjom komponente potrage i spašavanja dobiveni su vrijedni uvidi o utjecaju održivosti simuliranih putnika jer su se provodili potiskivanje, ventilacija i pretraga kako bi se simulirani putnici uklonili iz opasnog okruženja.

Bez obzira u kojem dijelu objekta je požar, njegovo gašenje je otežano. Ako je požar u donjoj zoni, onda ga je relativno lakše gasiti, ali postoji problem evakuacije ljudi, a veći je broj onih koji su iznad požara, dok ako je požar u gornjoj zoni, imamo manji broj ugroženih, ali zato je gašenje jako otežano. Mnogo je uvjeta koje je potrebno ispuniti kako bi gašenje bilo uspješnije.

Parametri koji, uvjetno rečeno, definiraju urbanističke uvjete su:[4]

- visina građevine zahvaćene požarom kao i visina okolnih građevina. Iskustvo pokazuje da je povoljnije ako je objekt zahvaćen požarom niži od objekata koji ga okružuju nego obrnuto zbog slabijeg strujanja zraka i relativne zaklonjenosti od puhanja vjetra. Budući da se prilikom projektiranja ne može predvidjeti koja će se zgrada zapaliti, a koja ne, najbolje je rješenje izgraditi dijelove grada zgradama približno iste visine.
- položaj građevina, što se prije svega odnosi na njihovu udaljenost u odnosu na susjedne, koja treba biti takva da ne dopušta širenje požara s jedne na drugu građevinu čak ni u uvjetima maksimalnog puhanja vjetra.
- mogućnost dolaska i prolaska vatrogasnih vozila. Širina i propusna moć prometnica od požarišta do ugroženih objekata izravno je povezana s uspješnošću gašenja, jer se brzim dolaskom vatrogasnih vozila smanjuje vrijeme slobodnog razvoja požara. Osim toga, vrlo bitan čimbenik je mogućnost približavanja vatrogasnih vozila zgradi. Svjedoci smo da zbog nepostojanja adekvatnih prometnica kao i nepropisno parkiranih vozila, vatrogasci vrlo sporo stižu do zapaljenih objekata. Rješenje bi bilo izgraditi protupožarne putove po obodu zgrade i eliminirati parkiranje vozila na tim cestama.
- zelenilo. Biljke također mogu imati značajnu ulogu u sprječavanju prijenosa i razvoja plijesni, prvenstveno zbog smanjenja protoka zraka i djelomičnog upijanja topline.

Dakako, visoko raslinje ima daleko veći pozitivni učinak od niskog. Visoke zgrade u koje su tijekom gradnje ugrađeni tehnički sustavi zaštite od požara i ispoštovani svi tehnički standardi daleko su sigurnije od onih koje to nisu. Stoga je gašenje požara na takvim objektima uspješnije. Namjena objekta važna je odrednica za definiranje preventivno tehničkih uvjeta.

Naravno, ispunjenje svih uvjeta predstavlja idealnu varijantu koju je teško postići, pa se moramo pomiriti s činjenicom da će kod svakog požara biti određenih problema. Što više uvjeta bude ispunjeno, to će biti manje problema.

Sigurno je da postoje još neki uvjeti koje treba ispuniti i da se njihovo grupiranje može izvršiti na drugi način. Zahtjev ovog priloga nije odgovoriti na sva pitanja, već navesti osnovne uvjete u skladu s autorovim iskustvima s požarima u višekatnicama.

## **2.2. Pripremljenost vatrogasaca**

Vatrogasci ulaze u radnu snagu kroz proces zapošljavanja vezan uz fizičke, taktičke i psihološke parametre (npr. psihometrijske procjene, tjelesne sposobnosti i medicinski testovi, kao i drugi procesi temeljeni na zaslugama). Zbog fizikalnosti početnog testiranja, vatrogasci obično započinju posao s odgovarajućom razinom snage i izdržljivosti kako bi ispunili inherentne zahtjeve vatrogastva.[1]

Očekuje se da održavaju dobru fizičku kondiciju kako bi mogli raditi u dinamičnim i nepredvidivim okruženjima koja se obično povezuju s ulogom vatrogasca. Međutim, istraživanja pokazuju da u godinama nakon ulaska, fizička spremnost vatrogasaca opada, utječući na njihove sposobnosti da odgovore na visoke fizičke zahtjeve gašenja požara i čineći ih osjetljivijima na kratkoročni i dugotrajni fizički i psihički stres i ozljede.

Uočene su promjene tijekom vremena koje mogu utjecati na izvedbu vatrogasaca, uključujući smanjeni aerobni kapacitet, mišićnu snagu i izdržljivost, a sve je to povezano s povećanim rizikom od kardiovaskularnih bolesti i smanjenom radnom učinkom.

Osim toga, stalna izloženost opasnim okruženjima koja uzrokuju psihološku traumu mogu imati dugoročne štetne učinke na mentalno zdravlje vatrogasaca, emocionalni umor, izgaranje na poslu i posttraumatski distress.

Zbog toga su istraživači i vatrogasne agencije podjednako pozvali na pojačanu akciju oko potencijalnih dobrobiti zdravstvenih intervencija i programa obuke koji bi mogli potaknuti vatrogasce da održe svoje zdravlje i kondiciju.

Štoviše, važno je da ovi programi razmotre kako najbolje osnažiti pojedince da povećaju svoju kontrolu nad svojim fizičkim i mentalnim blagostanjem i poboljšaju ga. Pronalaženje inovativnih načina za promicanje, uključivanje i podržavanje zdravlja i kondicije vatrogasaca može biti teško samo za vatrogasne agencije, osobito s obzirom na dinamičnu i nepredvidivu prirodu profesije.

Posuđivanjem iz istraživanja i prakse promicanja zdravlja, stvaranje partnerstva s relevantnim dionicima zajednice može poboljšati angažman u programima promicanja zdravlja i ima potencijal pozitivnog utjecaja na ishode fizičkog i mentalnog zdravlja. Na primjer, program Zdrava prehrana i životni stil europski je program promjene životnog stila usmjeren na poboljšanje cjeloživotne zdrave prehrane i tjelesne aktivnosti. Osmišljen je i implementiran u suradnji dionika iz lokalnih zdravstvenih okruga, nacionalnih zdravstvenih organizacija i organizacija za akreditaciju tjelovježbe, lokalnih vladinih vijeća i istraživača iz akademskih institucija. Evaluacija procesa i rezultati izvedivosti programa HEAL pokazali su da su partnerstva ključna za uspjeh lokalne provedbe i da su neophodna za doseganje i uključivanje članova zajednice u preventivne programe promicanja zdravlja.[5]

Slično tome, europski harmonizacijski program bio je zajednički napor zdravstvenih radnika, stručnjaka za liječenje raka, akademika i članova zajednice kako bi se unaprijedili pristupi prevenciji raka prestankom pušenja, zdravom prehranom i tjelesnom aktivnošću u ruralnim zajednicama.

Iako ovi programi nisu posebno usredotočeni na vatrogasce, objavljena saznanja vrlo su prenosiva na programe sa sličnim ciljevima (npr. poboljšati usvajanje programa i rezultate povezane s tjelesnom spremom), te s fokusom na suradnju dionika u dizajnu, provedbi i evaluaciji programa.

### 2.3. Pojam vatrogasca

Iako su se ljudi borili s požarima otkako postoje vrijedne stvari za spaljivanje, prvi primjer organizirane profesionalne borbe protiv strukturalnih požara dogodio se u starom Egiptu. Isto tako, vatrogasci Rimske republike postojali su isključivo kao privatno organizirane i financirane skupine koje su djelovale više nalik poslu nego javnoj službi; međutim, tijekom razdoblja Principata, August je revolucionirao vatrogastvo pozivajući na stvaranje vatrogasne straže koju je obučavala, plaćala i opremala država, čime je pokrenuo prvu istinski javnu i profesionalnu vatrogasnu službu. Poznati kao Vigiles, bili su organizirani u kohorte, služeći kao noćna straža i gradska policija.[1]

Najranije američke vatrogasne postrojbe bile su dobrovoljne, uključujući dobrovoljno vatrogasno društvo u New Amsterdamu, sada poznatom kao New York. Vatrogasna društva bila su sastavljena od građana koji su volontirali svoje vrijeme kako bi pomogli u zaštiti zajednice. Kako je vrijeme odmicalo i osnivali su se novi gradovi diljem regije, došlo je do naglog porasta broja volonterskih odjela.

Godine 1853. osnovana je prva karijerna vatrogasna postrojba u Sjedinjenim Državama u Cincinnatiju, Ohio, a četiri godine kasnije Vatrogasna postrojba St. Louisa. Veliki gradovi počeli su zapošljavati plaćeno osoblje s punim radnim vremenom kako bi pokušali omogućiti veći broj poziva.

Gradske vatrogasne službe financiraju se izravno iz gradskih poreza i dijele isti proračun kao i drugi javni radovi poput policije i komunalnih službi. Osnovna razlika između općinskih odjela i gradskih odjela je izvor financiranja. Općinske vatrogasne službe ne dijele svoj proračun ni s jednom drugom službom i smatraju se privatnim subjektima unutar svoje nadležnosti. To znači da oni imaju vlastite poreze koji ulaze u njihove proračunske potrebe. Gradske vatrogasne službe odgovorne su gradonačelniku, dok su općinske službe odgovorne dužnosnicima izabranih odbora koji pomažu u održavanju i vođenju odjela zajedno s glavnim službenicima.[2]

Vatrogasac je osoba koja prva reagira i spašava, opsežno je obučen za gašenje požara, prvenstveno za gašenje opasnih požara koji prijete životu, imovini i okolišu, kao i za spašavanje ljudi, a u nekim slučajevima ili jurisdikcijama i životinja iz opasnih situacija.

Vatrogasna služba, također poznata u nekim zemljama kao vatrogasna postrojba ili vatrogasna služba, jedna je od tri glavne hitne službe. Od urbanih područja do brodova, vatrogasci su postali sveprisutni diljem svijeta.

Vještine potrebne za sigurne operacije redovito se uvježbavaju tijekom ocjenjivanja obuke tijekom cijele vatrogasne karijere. Početne vatrogasne vještine obično se podučavaju putem lokalnih, regionalnih ili državnih odobrenih vatrogasnih akademija ili tečajeva. Ovisno o zahtjevima odjela, dodatne vještine i certifikati kao što su tehničko spašavanje i predbolnička medicina također se mogu steći na ovom vrijeme.[10]

Vatrogasci blisko surađuju s drugim agencijama za hitne slučajeve kao što su policija i hitna medicinska pomoć. Uloga vatrogasca može se preklapati s objema. Protupožarni istražitelji ili vatrogasni službenici istražuju uzrok požara. Ako je požar izazvan podmetanjem požara ili nemarom, njihov će se posao preklapati s policijskim snagama.

Vatrogasci također često pružaju određeni stupanj hitne medicinske usluge, uključujući certificiranje i rad kao bolničari s punim radnim vremenom iz motornih, kamionskih i spasilačkih tvrtki u nekim sustavima kako bi započeli napredno održavanje života do dolaska hitne pomoći.

#### **2.4. Dužnosti vatrogasaca**

Vatra gori zbog prisutnosti tri elementa: goriva, kisika i topline. To se često naziva vatreni trokut. Ponekad je poznat kao vatreni tetraedar ako se doda četvrti element: kemijska lančana reakcija koja može pomoći u održavanju određenih vrsta požara. Cilj gašenja požara je lišiti požar barem jednog od tih elemenata.[7]

Najčešće se to radi gašenjem vatre vodom, iako su za neke požare potrebne druge metode poput pjene ili suhих sredstava. Vatrogasci su opremljeni širokom paletom opreme za tu svrhu koja uključuje kamione s ljestvama, kamione s pumpama, kamione cisterne, vatrogasna crijeva i aparate za gašenje požara.

Dok ponekad požari mogu biti ograničeni na mala područja građevine, uobičajena je šira kolateralna šteta zbog dima, vode i gorućeg žara. Isključivanje komunalnih izvora (kao što su plin i struja) obično je rani prioritet za vatrogasne ekipe koje dolaze. Osim toga, može biti



potreban nasilan ulazak kako bi se dobio pristup strukturi. Potrebni su posebni postupci i oprema na imanju gdje se koriste ili skladište opasni materijali.

Slika 1. Prikaz spašavanja vatrogasaca



Izvor: [https://www.syracuse.com/news/2010/12/two\\_firefighters\\_dead\\_17\\_injur.html](https://www.syracuse.com/news/2010/12/two_firefighters_dead_17_injur.html)

Požari na konstrukcijama mogu biti napadnuti s "unutarnjim" ili "vanjskim" resursima, ili oboje. Unutarnje ekipe, koristeći pravilo "dva unutra, dva van", mogu produžiti vatrogasne cijevi unutar zgrade, pronaći vatru i ohladiti je vodom. Vanjske ekipe mogu usmjeravati vodu u prozore i druge otvore, ili na bilo koje obližnje gorivo izloženo početnoj vatri. Mlaznice crijeva usmjerene u unutrašnjost kroz otvore na vanjskim zidovima mogu se sukobiti i ugroziti unutarnje vatrogasne ekipe.[10]

Zgrade koje su napravljene od zapaljivih materijala kao što je drvo razlikuju se od građevinskih materijala kao što je beton. Općenito, "vatrootporna" zgrada je dizajnirana da ograniči vatru na malo područje ili kat. Ostali podovi mogu biti sigurni sprječavanjem udisanja dima i oštećenja. Sve zgrade za koje se sumnja ili su u požaru moraju se evakuirati, bez obzira na stupanj požara.

Neke taktike gašenja požara mogu se činiti destruktivnima, ali često služe određenim potrebama. Na primjer, tijekom ventilacije, vatrogasci su prisiljeni otvoriti rupe na krovu ili podovima građevine (zvana vertikalna ventilacija), ili otvoriti prozore i zidove (zvana horizontalna ventilacija) kako bi uklonili dim i zagrijane plinove iz unutrašnjosti strukture.[10]

Takve se metode ventilacije također koriste za poboljšanje unutarnje vidljivosti radi bržeg lociranja žrtava. Ventilacija pomaže u očuvanju života zarobljenih ili onesviještenih pojedinaca jer ispušta otrovne plinove iz unutrašnjosti strukture. Vertikalna ventilacija ključna je za sigurnost vatrogasaca u slučaju scenarija bljeska ili povratnog strujanja. Ispuštanje zapaljivih plinova kroz krov eliminira mogućnost povratnog strujanja, a uklanjanje topline može smanjiti mogućnost bljeska, a zbog svoje jake vrućine (900–1200 °F (480–650 °C)) i eksplozivnog temperameta, obično su kobni za vatrogasno osoblje. Metode predostrožnosti, kao što je razbijanje prozora, otkrivaju situacije povratne struje prije nego što vatrogasac uđe u strukturu i suoči se s tom okolnošću. Sigurnost vatrogasaca je prioritet broj jedan.

Kad god je to moguće tijekom požara građevine, imovina se premješta u sredinu prostorije i prekriva zaštitnim pokrivačem, teškom ceradom nalik na tkaninu. Različiti koraci kao što su pronalaženje i zaštita dragocjenosti pronađenih tijekom gašenja ili remonta, evakuacija vode i prozori i krovovi mogu preusmjeriti ili spriječiti otjecanje nakon požara.

Vatrogasci spašavaju ljude (i životinje) iz opasnih situacija kao što su sudarena vozila, urušavanje konstrukcije, urušavanje krovova, hitni slučajevi u pećinama i tunelima, hitni slučajevi s vodom i ledom, hitni slučajevi dizala, hitni slučajevi električnih vodova pod naponom i industrijske nesreće.

U rjeđim okolnostima, vatrogasci spašavaju žrtve u hitnim slučajevima s opasnim materijalima, kao i na strmim liticama, nasipima i visokim usponima - potonje se naziva spašavanje pod visokim kutom ili spašavanje pomoću užeta. Mnoge vatrogasne službe, uključujući većinu u Ujedinjenom Kraljevstvu, sebe nazivaju vatrogasnom i spasilačkom službom iz tog razloga.[10]

Velike vatrogasne službe, poput vatrogasne službe grada New Yorka i vatrogasne brigade Londona, imaju specijalizirane timove za napredno tehničko spašavanje. Budući da su požari u zgradama u razvijenim zemljama kao što su Sjedinjene Države već godinama u opadanju, spašavanja osim požara čine sve veći udio rada njihovih vatrogasaca.

Vatrogasci često pružaju određeni stupanj hitne medicinske pomoći. U nekim je jurisdikcijama prva pomoć jedina medicinska obuka koju vatrogasci imaju, a samo medicinski pozivi isključiva su odgovornost posebne agencije za hitnu medicinsku pomoć (EMS).

Drugdje je uobičajeno da vatrogasci odgovaraju samo na medicinske pozive. Poticaj za to je sve veća potražnja za hitnom medicinom i smanjenje požara i tradicionalnih vatrogasnih poziva iako vatrogasne službe još uvijek moraju biti u stanju odgovoriti na njih i njihova postojeća sposobnost da brzo reagiraju u hitnim slučajevima. Brz odgovor je posebno potreban za srčani zastoj, budući da će oni dovesti do smrti ako se ne liječi unutar nekoliko minuta.[7]

Slanje vatrogasaca u hitne medicinske slučajeve posebno je uobičajeno u vatrogasnim službama koje vode hitnu medicinsku pomoć, uključujući većinu velikih gradova u Sjedinjenim Državama.

U tim odjelima vatrogasci se često zajedno obučavaju za hitne medicinske tehničare kako bi pružili osnovno održavanje života, a rjeđe kao bolničari za pružanje naprednog održavanja života. U Ujedinjenom Kraljevstvu, gdje se vatrogasne službe i hitna pomoć vode odvojeno, nedavno je uvedeno zajedničko odgovaranje vatrogasnih službi.

Još jedna točka varijacije je hoće li vatrogasci odgovoriti vatrogasnim vozilom ili autom za hitne intervencije. U svakom slučaju, i dalje su potrebni posebni zaposlenici za posadu vozila hitne pomoći, osim ako vatrogasci ne mogu raditi u smjenama na vozilima hitne pomoći.

## **2.5. Organizacija gašenja požara**

Gašenje požara prvenstveno je tehnički postupak usmjeren na zaštitu života ljudi i imovine ugrožene požarom. Kako bi se ovaj postupak učinkovito proveo potrebna je odgovarajuća tehnička oprema. O tome u velikoj mjeri ovisi uspješnost gašenja.

Gašenje požara ovisi o:[5]

- količina opreme, da bi voditelj akcije gašenja požara mogao uspješno voditi intervenciju gašenja, mora raspolagati s dovoljno tehničkih sredstava sukladno procjeni njihove upotrebe. Izbor taktike gašenja ovisi i o količini tehničkih sredstava i opreme. Posve je razumljivo da će intervencija biti uspješnija ako vatrogasna postrojba ima dovoljno opreme. Budući da se vatrogasna oprema ne može nabaviti nakon izbijanja požara, potrebno je da vatrogasne jedinice budu opremljene za gašenje požara u najnepovoljnijoj varijanti za područje na kojem djeluju.
- tehničko-tehnološke karakteristike opreme, dovoljna količina opreme nije jedini uvjet za uspješan rad. Važno je imati opremu takvih tehničko-tehnoloških karakteristika koje će

vatrogascima omogućiti adekvatan odgovor u suvremenim uvjetima požara. Suvremenim materijalima i opasnostima, uz suvremenu opremu. To nije uvjet, već uvjet za uspješno gašenje.

- stanje tehničke opremljenosti, posjedovanje dovoljno opreme zadovoljavajućih karakteristika nije dovoljan uvjet za dobro funkcioniranje. Potrebno je kvalitetno održavati opremu kako bi ona u svakom trenutku bila u ispravnom stanju. Ovo je važna zadaća pripadnika vatrogasnih postrojbi kako bi se stvorili uvjeti za uspješan interventni rad.

Osoblje je ključni čimbenik u gašenju požara i spašavanju ljudi i njihove imovine, čak i u visokim zgradama. Oni su ti koji uz pomoć opreme obavljaju najsloženije poslove gašenja. Da bi se to uspješno izvelo, moraju biti zadovoljene određene pretpostavke.

Kako bi vatrogasni tim bio spreman potrebno je imati:[5]

- organizacija, vatrogasna postrojba mora biti formirana i organizirana tako da ima potpuno jasnu strukturu s točno određenim položajem i ulogom pojedinca u njoj. Uz potrebnu disciplinu u izvršavanju zadaća, svaki pojedinac i postrojba u cjelini moraju ulijevati povjerenje granama za uspješan ishod intervencije.
- broj članova vatrogasnog društva, kako bi u određenom trenutku mogli adekvatno odgovoriti, vatrogasna postrojba mora imati dovoljan broj trenutno raspoloživih članova. Broj pripadnika vatrogasne postrojbe utvrđuje se u slučaju najnepovoljnijeg požara na određenom području, vodeći računa o veličini područja i mogućnosti višestrukih istodobnih požara.
- Iskustvo pokazuje da se požar na visokim zgradama teško može ugaziti s manje od dvadesetak vatrogasaca.

Za uspješno djelovanje svi pripadnici vatrogasne postrojbe moraju biti osposobljeni za rad s opremom koja im je na raspolaganju do rutinske razine. Samo s tim stanjem mogu adekvatno reagirati u datim situacijama. Dobrom obukom vatrogasac stječe povjerenje u opremu s kojom radi, što je imperativ ovog zanimanja.

Vatrogastvo je vrlo naporan posao, kako fizički tako i psihički. Osim golemih fizičkih napora koje vatrogasci podnose kako bi stepenicama (jer je zabranjeno korištenje dizala) prevezli veliku količinu opreme na požarište, opterećeni su i psihički jer se na svakoj intervenciji susreću s ljudskom patnjom. Samo psihofizički dobro pripremljen vatrogasac može uz sve fizičke napore izdržati i oduprijeti se atmosferi koju stvaraju ozlijeđene i ugrožene osobe na požarištu.

### **3. PROBLEMATIKA GAŠENJA U TUNELIMA**

#### **3.1. Uloga tunela u današnjem načinu življenja**

Ispitivanje požara u tunelu je zamišljeno kao kontrolirani požarni događaj gdje se mjere i bilježe karakteristični parametri (kao što je brzina gorenja mase, temperaturno polje i gradijenti tlaka) za daljnju analizu. Testovi požara mogu se osmisliti za mjerenje učinkovitosti i pouzdanosti sustava za otkrivanje požara, stvarnih performansi instaliranih ventilacijskih sustava ili za karakterizaciju kvalitete zraka u zatvorenom prostoru i razvoja sloja dima.[6]

Štoviše, omogućuju testiranje nove opreme, materijala, sustava detekcije, kao i obuku vatrogasaca i pružatelja prve pomoći za spašavanje ozlijeđenih i onih u opasnosti, procjenu veličine požara mapiranjem toplinskog polja, kontrolu stvaranja dima i protoka i smanjiti toplinska oštećenja na konstrukcijama.

Faze projektiranja protupožarnog ispitivanja mogu se sažeti kao:[6]

- funkcionalna klasifikacija tunela (prema npr. njegovom odredištu ili njegovim strukturnim značajkama);
- definicija referentnog izvora požara (izbor goriva i njegova masa određuju trajanje kontroliranog događaja): preliminarne numeričke simulacije, dobivene iz rješenja odgovarajućeg modela polja i zone kako bi se dobile procjene brzine širenja dima, temperature i polja brzine unutar tunela, za požare različite magnitude i za različite režime ventilacije, korištenjem komercijalnih ili otvorenih kodova;
- funkcionalni raspored i definiranje instrumentacije,

Jedan od temelja postojanja moderne industrijske zajednice je osiguranje pouzdane, sigurne i brze prometne infrastrukture, kao i sigurnog i učinkovitog javnog prijevoza u gradovima.

Prometno opterećenje međunarodnih željezničkih i cestovnih mreža iznimno je poraslo tijekom posljednjih desetljeća, posebice s obzirom na broj teretnih vlakova i teških kamiona. Učinkovitost prometa poboljšana je izgradnjom brzih željezničkih linija i razvojem mreže autocesta. Kao posljedica tipskih projekata uzdužnih dionica, pojavila se potreba za izgradnjom tunela i tunnelske mreže u planinskim područjima. Promatranja jasno pokazuju da se sve veći prometni zahtjevi u gradovima mogu najbolje ispuniti poboljšanjem ili izgradnjom podzemnih prometnih mreža.

### **3.2. Složenost požara u tunelu**

Tjeranjem prometa željezničkog, cestovnog ili javnog u tunele, odnosno u zatvorene prostore, znatno se povećavaju potrebni sigurnosni zahtjevi kako za zahtjeve zaštite ljudskih života tako i za zaštitu građevina. U slučaju nenormalnih radnih uvjeta, najopasnija situacija za ljudske živote ili konstrukciju tunela je požar.

Unatoč rastućim i rigoroznim sigurnosnim direktivama, broj nesreća i šteta u tunelima diljem svijeta pokazuje tendenciju rasta. Razlozi za ovo povećanje su:[2]

- povećanje prometnog opterećenja, sa sve većim postotkom kamiona s prikolicom
- povećanje brzine, što dovodi do povećanja kinematičke energije masa koje se sudaraju u slučaju nesreće.

Ova je izjava bitan element sigurnosnog dizajna tunela novih željezničkih mreža velikih brzina koje su trenutno u izgradnji. Povećanje duljine tunela, kao objekta naprednih tehnologija gradnje, ali i zahtjeva javnosti, gospodarstva i okoliša. – sve veća mogućnost terorističkih napada, posebice u slučaju tunela u gradovima s podzemnom mrežom koji su posljednjih desetljeća postali meta terorističkih napada. Između 2000. i 2004. zabilježeno je 40 ozbiljnih incidenata požara u tunelima, uključujući dolje navedene najteže slučajeve. Također oko 30 ljudi je poginulo 1999. u nesreći u tunelu Mont Blanc. Međutim, statistička analiza pokazuje da je promet u tunelima relativno sigurniji od prometa na otvorenoj cesti.[2]

Glavni razlozi za to su zbog instalacije sustava ranog informiranja, detektora dima i požara, automatskog upozoravanja i protupožarnih sustava, izgradnje izlaza za nuždu. Ipak, postoje bitne razlike između posljedica nesreća u zatvorenim i otvorenim prostorima. U zatvorenim prostorima požar je opasniji zbog neposredne blizine osoba i utjecaja na materijale nosivih konstrukcijskih elemenata.

Istraživanje strukturnog ponašanja materijala pod izravnim požarnim opterećenjem igra važnu ulogu u međunarodnim istraživanjima. Ponašanje materijala u elementu nosive konstrukcije, kao i ponašanje samog elementa konstrukcije, zasebno ili zajedno, u fokusu je brojnih istraživačkih programa. Međutim, ponašanje materijala ne ovisi samo o vrsti strukture.[2]

Kombinirano ponašanje u tunelu ne može se usporediti s onim u visokoj zgradi u slučaju požara. Prva razlika je varijacija zapaljivih materijala, a druga barijere koje blokiraju ventilaciju i širenje vatre kao i posljedično nakupljanje topline. Akumulacija topline vrlo je opasna u zatvorenim tunelima. Debeli poprečni presjeci struktura i okolne stijene ili tla izuzetno sporo rasipaju razvijenu toplinu. Stoga je velika mogućnost brzog razvoja visokih temperatura plina u području požara.

### **3.3. Modeli tunelskih požara**

Modeli tunelskog požara s ciljem procjene njegovog učinka na korisnike tunela i na sigurnosne scenarije razvrstavaju se u termodinamičke modele, odnosno modele zona, koji se temelje na termodinamičkoj analizi otvorenih sustava, a rješavaju proračunskim tablicama ili matematičkim solverima, te terenskim modelima, tj. jedno-, dvo- ili trodimenzionalni CFD modeli, riješeni komercijalnim ili otvorenim kodom.[6]

Svi ulazni podaci modela povezani su s posebnim scenarijem požara, uključujući položaj požara u tunelu, veličinu izvora požara i stopu rasta te uvjete ventilacije. Izlazi modela (npr. temperaturno polje, kretanje dima i koncentracija) mogu se zatim koristiti za određivanje "opasnog toka" duž samog tunela.

Unosi mogu biti ili deterministički (npr. pojedinačne vrijednosti HRR-a, determinističke stope rasta, dodijeljeni uvjeti ventilacije) ili stohastički (tj. karakterizacija istih veličina u smislu funkcija distribucije). U oba slučaja, modeli se mogu riješiti odgovarajućim metodama integracije.

Na HRR tunelskih izvora požara može utjecati nekoliko varijabli: količina, geometrija, oblik i vrsta materijala koji gori (požarno opterećenje); uvjeti ventilacije (polje brzine); geometrija tunela, nagib, površina poprečnog presjeka; svojstva materijala površine tunela; postojanje sustava za ublažavanje i suzbijanje, ili intervencija vatrogasaca.

Tijekom proteklih 15 godina Grupa za istraživanje plamena na Politehnici di Torino je prikupljala informacije o HRR-ovima u požarima u tunelima iz eksperimenata u punom i smanjenom opsegu, kao i iz rezultata drugih istraživačkih grupa. Na temelju ovih rezultata razvijeni su modeli za predviđanje HRR-a koji će se koristiti kako u projektiranju novih tunela tako i u nadogradnji postojećih. Konkretno, projektirani požari mogu se razvrstati u: linearnu krivulju - linearni rast i slabljenje s konstantnim maksimalnim trajanjem HRR-a; (ii) kvadratne krivulje-kvadratni rast i eksponencijalni pad s konstantnim maksimalnim trajanjem HRR-a; (iii) eksponencijalna krivulja eksponencijalni rast i opadanje HRR.[2]

### **3.4. Proces požara u tunelu**

Tijekom požara u tunelu razvija se ogromna količina topline. Toplina koja se razvija može se raspršiti samo sporo zbog oblika strukture i okolnog tla i stijena. Stoga se na mjestu požara u konstrukciji mogu formirati značajne vrijednosti temperature zraka. Međunarodna istraživanja pružaju vrijedne informacije o evoluciji toplinske mase na temelju teoretskih pretpostavki u malim ili velikim testovima.

Posebne krivulje svojstava požara sastavile su zapadnoeuropske prakse koje izračunavaju bržu akumulaciju topline i višu vrijednost maksimalne temperature od “konvencionalnih” karakteristika koje vrijede u stvarnim zemljama. Stoga su posebne krivulje preporučljive za numeričko modeliranje utjecaja topline požara na zid, kao i za istraživanje konstrukcijskih materijala i same konstrukcije.[6]

Nadalje, temperatura zraka oko mjesta požara ima raspodjelu kako u poprečnom tako i u uzdužnom presjeku tunela. Time se mogu odrediti temperaturne vrijednosti za opterećenje konstrukcije. Može se reći da projektiranjem novog tunela, iz kojeg zapaljeno vozilo ne može pobjeći, treba ispitati posljedice razvijanja topline.



Slika 2. Prikaz intervencije u tunelu



Izvor: <https://www.ifa-swiss.ch/en/magazine/detail/from-the-major-fire-in-the-gotthard-road-tunnel-in-2001-to-deployment-confidence-in-tunnel-fires>

U starijim tunelima, gdje nije uočena otpornost konstrukcije na toplinu, treba uzeti u obzir ista razmatranja i konstrukciju treba opremiti dodatnom protupožarnom zaštitom. Stoga je u Mađarskoj potrebno utvrditi naše standarde za karakterizaciju požara u tunelima. U tu svrhu trebaju se provesti istraživanja (testiranje u punom mjerilu i mali modeli, numerička analiza) uz prihvaćanje europskih propisa i standarda.

Znanje stečeno kroz godine istraživanja (i kroz katastrofe koje su se dogodile u prošlosti) naučilo nas je nekim lekcijama koje su sažete u nastavku. Prije svega, metode analize rizika za projektiranje i upravljanje cestovnim i željezničkim tunelima trebale bi uključiti načela i metode klasičnog determinističkog inženjeringa zaštite od požara (analiza scenarija) u probabilistički okvir. Iako su ovi koncepti u potpunosti ugrađeni u talijanske standarde, njihova praktična primjena još uvijek je nejasna. Korištenje preskriptivnih smjernica izvedenih iz uobičajene prakse i iz profesionalnog ili korporativnog iskustva u projektiranju tunela može se činiti korisnim ako se pretpostavi da su svi tuneli slični. Međutim, to nije nužno slučaj, a netipične tunele treba razmatrati pojedinačno.

Štoviše, krajnji učinci propisa i hitnih postupaka uvelike ovise o scenariju. Iz istog razloga, trebalo bi obeshrabriti korištenje CFD simulacija koje su napravili praktičari s ograničenim znanjem o tunelskim sustavima. Ventilacijski sustavi instalirani su u cestovnim tunelima više od jednog stoljeća, tako da ne čudi da su najraniji postupci zaštite od požara pokušavali kontrolirati i usmjeravati protok dima pomoću ventilacije. [2]

Nažalost, to nije uvijek najbolja stvar za učiniti u hitnim slučajevima: zapravo, pokazalo se da bi veliki protok zraka potreban za odvođenje dima stvorio teže uvjete dovodom kisika u vatru. Osim toga, nepravilna uporaba ventilacije uzrokovala bi još više žrtava. Prema drugom uobičajenom uvjerenju, korištenje sustava sprinklera ometalo bi evakuaciju ljudi i moglo bi čak smanjiti izdržljivost tunela stvaranjem pare i uništavanjem slojeva dima.

Međutim, niz nedavnih studija za procjenu učinkovitosti sustava za suzbijanje i ublažavanje temeljenih na vodi (i sustavi kiše i vodena magla) utvrdili su da iako je istina da ovi sustavi uništavaju slojeve dima, oni također smanjuju veličinu požara i zaustavljaju širenje plamena, što na kraju dovodi do manjeg otpuštanja topline i manjeg stvaranja dima.

## **4. SLOŽENOST GAŠENJA U TUNELU**

### **4.1. Koncept građe tunela**

Tuneli su neodvojivi dio infrastrukture za prometovanje, prethodni požari u tunelima pokazuju da takve nesreće mogu imati ozbiljne gubitke života i velike ekonomske gubitke. Požari u tunelima mogu generirati visoke temperature i velike toplinske tokove koji mogu ometati evakuaciju, zabraniti vatrogasne mjere, oštetiti strukturu tunela i zatvoriti tunel na dulje vrijeme.

Požar tunela Mont Blanc 1999. godine rezultirao je smrću 38 ljudi i zatvorio tunel na tri godine. U požaru tunela Tauern iste godine život je izgubilo 12 ljudi, a tunel je zatvoren tri mjeseca. Te i mnoge druge katastrofe u požaru u tunelima pokreću potrebu za razumijevanjem dinamike požara u tunelima i utjecajima takvih požara. Uzdužna ventilacija koristi se za održavanje prijateljskog okruženja tunela kada je tunel u normalnom radu.[11]

Slika 3. Požar u Mount Blancu



Izvor: <https://www.nytimes.com/2019/03/21/business/mont-blanc-tunnel-fire-anniversary-rescue.html>

Načelo uzdužne ventilacije stoga se u velikoj mjeri koristi za ventilaciju tunela. Tijekom požara u tunelu, uzdužna ventilacija može prisiliti plinovite produkte požara do jednog definiranog ulaza u tunel, osiguravajući da drugi kraj tunela bude dostupan za evakuaciju i gašenje požara. Potrebna brzina ventilacije kako bi se spriječilo da se proizvodi dima u oba smjera odmiču od izvora požara naziva se kritična brzina ventilacije.[3]

Katastrofalni požari u tunelima rezultirali su gubicima života, velikim gubicima imovine i relativno dugim razdobljima prekida poslovanja. Nakon takvih požara, vlasti nastoje usmjeriti svoje napore gotovo isključivo na rješavanje problema protivpožarne sigurnosti. Očuvanje imovine i aspekti kontinuiteta poslovanja uglavnom se ne uzimaju u obzir. Sa stajališta upravljanja rizikom ova situacija nije održiva. Rješenja za zaštitu od požara trebaju biti uključena kao dio cjelokupnog projekta transportnog tunela.

Općeniti pomak s propisanog na donošenje odluka zasnovanih na učinku s obzirom na protupožarnu sigurnost tunela je mač s dvije oštrice. Na neki način to je vrlo poželjan pomak, ali na druge načine može se vratiti. Što god drugo podrazumijevalo, to znači da postoji potreba za procjenom rizika na neki način i to je dobro. Propisi na recept, uključujući kodekse i vodiče o „najboljoj praksi“, igrali su vitalnu ulogu u društvu i trebali bi to i dalje činiti.

Požari se mogu proširiti unutrašnjošću građevine kao vrući plinovi širenje uslijed širenja plinova kao rezultat izgaranja. Neke se požari mogu djelomično kontrolirati odzračivanjem tih plinova prema van kroz izrađene otvore za grijanje na krovu konstrukcije ili vatrogascima koji režu rupe na krovu.[2]

Ventilacija je važna kada je riječ o vatrogasnoj službi, jer je to "sustavno uklanjanje ili toplina, dim i vatreni plinovi iz konstrukcije".

Najbolje je vrijeme za provjetravanje prije slanja bilo koga u građevinu, tako da put kojim će vatra ići prolazi kroz krov, a ne kroz ulazna vrata kada ih vatrogasci otvore, dopuštajući više kisika da napaja vatru.

#### **4.2. Požarna sigurnost u tunelu**

Ključni cilj donošenja odluka o požarnoj sigurnosti u tunelima može se smatrati održavanjem rizika unutar prihvatljivih raspona. To bi se odnosilo na:[3]

1. smrtno slučajevne i ozljede,
2. gubitak imovine i
3. prekid rada.

Međutim, s čisto propisanim pristupom dizajneri tunela, operatori i korisnici zapravo nisu svjesni koji su rizici s obzirom na gore navedene tri kategorije.

Povijesne statistike daju nam određenu predodžbu o riziku koji se podrazumijeva u određenom sustavu; međutim, ključni je problem sa jednostavnim gledanjem statistike, a to je sljedeće: sustav se mijenja s vremenom. Jednostavno razmatranje povijesnih statistika u vezi s određenim tunelom tijekom dugog razdoblja, recimo 20 godina, može biti vrlo zavaravajuće jer je sigurno

da će se sustav kakav postoji u jednom trenutku razlikovati od sustava koji postoji 20 godina kasnije - ili čak pet ili deset godina kasnije.[11]

Ako uzmemo u obzir samo jedan čimbenik, povećanje prometa vjerojatno znači da su se sustavi povezani s većinom cestovnih tunela dramatično promijenili posljednjih godina. Iako propisani pristup to ne bi prepoznao (barem izričito), prepoznao bi se u pristupu temeljenom na riziku; ili bi barem trebalo biti. Odnosno, pristup zasnovan na riziku može biti vrlo vrijedan u pomaganju u suočavanju s donošenjem odluka u sve složenijem svijetu koji se stalno mijenja.

Poznato je da su zidovi tunela od armiranog betona vatrootporni. Međutim, obloge tunela osjetljive su na velike požare, što može rezultirati otpadanjem ili urušenim betonom.

Štoviše, cjelovitost betonske konstrukcije može biti ugrožena ovisno o vrsti konstrukcije koja je uključena, uključujući upotrebu plastičnih vlakana. Toplinske barijere i zapaljivi kolnici dolijevat će ulje na vatru unutar tunela. Evakuacija u tunelima je kritična i nije dobro proučena.[11]

#### **4.3. Sustavi za otkrivanje požara u tunelu**

Razvijeni su različiti sustavi za otkrivanje požara, a neki su prilagođeni za tunele. Sustavi ranog otkrivanja požara u kombinaciji s posadama za hitno reagiranje ne mogu uvijek osigurati sigurnost života ili odgovarajuće ublažavanje gubitka imovine. Istraživanja i podaci o požarima u cestovnim tunelima su ograničeni, a u slučaju željezničkih tunela vrlo ograničeni. Ispitivanje brzine rasta požara nije dovoljno usredotočeno na stvarne požare, uključujući požare velikih vozila.

Ispitivanja su vrlo rijetka i provode se na starim vozilima izrađenim od manje zapaljivog materijala od modernih vozila. Informacije o ispitivanju razvoja požara i izvedbe fiksne zaštite od požara često se navode pogrešno ili zloupotrebljavaju.

Postojeći dostupni standardi za fiksne sustave zaštite od požara u tunelima pružaju okvir za pristup zasnovan na riziku, ali ne i kriterije dizajna za zaštitu od požara. S obzirom na otežane uvjete pristupa i slabu vidljivost u tunelu tijekom požara, ručno aktiviranje fiksnih sustava zaštite od požara moglo bi se odgoditi. Slijedom toga, ručno aktivirani fiksni sustavi zaštite od požara smatraju se manje pouzdanima od automatski aktiviranih.[11]

Lokalna ili djelomična zaštita, koja se sastoji od vodenih zavjesa namijenjenih ublažavanju vrućih plinova i migracije dima u cestovnim tunelima, ili dijelova zaštićenih raspršivanjem vode unutar željezničkih tunela (gdje bi se trebali voziti vlakovi u plamenu) ne smatraju se potpuno pouzdanim rješenjima.

Što se tiče zaštite od vodene magle, ne postoji prepoznata opća metoda projektiranja takvih sustava. Jedini odobreni sustavi vodene magle su unaprijed projektirani sustavi za zaštitu ograde; ne postoje za velika područja otvorenog plana poput tunela.

Štoviše, postoji samo nekoliko standarda o sustavima zaštite od požara u vodenoj magli i oni niti pružaju konačne kriterije izvedbe požara niti nude posebne smjernice o tome kako dizajnirati sustav za kontrolu, suzbijanje ili gašenje požara.[8]

Umjesto toga, oslanja se na nabavu i ugradnju navedene opreme ili sustava vodene magle koji su se dobro pokazali u testovima požara kao dio postupka popisa. Ne postoje pravila skaliranja za sustave vodene magle. Test ispuštanja važan je kako bi se provjerilo funkcionira li sustav ispravno.

Međutim, uspješno ispitivanje ispuštanja ne jamči da će sustav pružiti odgovarajuću zaštitu od požara. Promjena uvjeta, učinci ventilacije i svi nepovoljni uvjeti unutar tunela u slučaju nužde ozbiljno bi izazvali zaštitu od požara u vodenoj magli. Kao rezultat toga, pouzdanost takvih sustava smatra se upitnom.

U svjetlu gornjih razmatranja, postupak evakuacije ljudi u ovom je radu razmatran kako bi zaslužio detaljniju istragu. U tom pogledu čini se da alati za simulaciju predviđanja kretanja pješaka pružaju korisnu pomoć dizajnerima i istraživačima. Unatoč tome, ovi su se simulacijski alati do sada uglavnom koristili za modeliranje tokova pješaka u procesima evakuacije iz javnih ili privatnih zgrada, dok su izvedeni samo nekoliko puta za primjenu na sustav cestovnog prijevoza, a posebno u tunelima u slučaju požara.[4]

#### **4.4. Simulacijski modeli**

U literaturi je danas dostupno nekoliko simulacijskih modela s pripadajućim softverom kao alat za istraživanje sigurnosti ljudi u slučaju nužde u tunelu. Općenito ovi modeli evakuacije simuliraju čimbenike koji pripadaju dvije glavne kategorije. Prva kategorija odnosi se na fizičke

značajke poput širenja požara, posebno u tunelima, vozila koja sudjeluju u nesreći i geometrije tunela. Potonje je prije svega povezano s ljudskim ponašanjem, poput vremena za reakciju i napuštanje vozila, dok se krećete u određenom smjeru, odabirući i brzinu hodanja i izlazna vrata.

Drugim riječima, simulacije evakuacije ljudi obično se izvode na temelju softvera koji kao ulaz koristi rezultate dobivene kompatibilnim softverom koji modelira širenje vatre, dima i otrovnih plinova, kao i prisutnost prepreka i karakteristike tunela. Međutim, valja reći da većina ovih studija ne uzima dovoljno u obzir činjenicu da na interakciju između požara i evakuacije utječu vozila u redu u tunelu. To djeluje, za razliku od stanja izoliranih vozila, kao prepreka širenju požara.

Zapravo redovi vozila uzrokuju i više temperature i smanjenu uzdužnu brzinu protoka zraka, kao i brže smanjenje udaljenosti vidljivosti u tunelu, što negativno utječe na evakuaciju ljudi. Kao rezultat, postoje najmanje tri glavna razloga za opravdanje ovog rada. Prva je motivirana potrebom da se učinkovitije istraži postupak evakuacije zbog požara u tunelu.[8]

Drugo je postavljanje simulacijskog modela za predstavljanje s dovoljnim realizmom evakuacije ljudi iz tunela u hitnim uvjetima. Konačno, razumijevanje kako se učinci požara mogu proširiti iz zapaljenog vozila na druga područja tunela uzimajući u obzir prisutnost vozila u redu i kako to ometa evakuaciju.

Na vrijeme evakuacije prvenstveno utječe vrijeme šetnje, a u manjoj mjeri i vrijeme prije kretanja u svim istraženim scenarijima. Utvrđeno je da je prosječno ukupno vrijeme evakuacije iznosilo 539 s u slučaju dima koji ne iritira i 695 s u prisutnosti nadražujućeg dima, u usporedbi s vrijednošću od 524 s, pronađenoj u odsustvu dima.[3]

Prisutnost dima utječe na proces izlaska smanjivanjem brzine hodanja, u većoj mjeri u slučaju nadražujućeg dima. Procjenjuje se da se prosječna brzina hodanja smanjila s 1,1 m/s bez dima na 1,0 m/s s ne nadražujućim dimom, do 0,7 m/s u prisutnosti nadražujućeg dima. Prisutnost sustava ventilacije u nuždi sposobna je djelomično kontrolirati razvoj dima tijekom požara. Suprotno tome, prisutnost alarmnog sustava većini korisnika tunela može smanjiti vrijeme evakuacije, omogućavajući im da sigurno dođu do izlaza iz tunela.



Kada je prisutan alarmni sustav, utvrđeno je da je prosječno vrijeme evakuacije 449 s u slučaju ne-nadražujućeg dima, odnosno 514 s u prisutnosti nadražujućeg dima. Usporedba između raspoloživog vremena sigurnog bijega (ASET) i potrebnog vremena sigurnosnog izlaska (RSET) pokazala je da se za korisnike tunela mogu dogoditi smrtonosni uvjeti u slučaju pretpostavljenih scenarija požara.[3]

Iako su autori uvjereni da su provedbom odgovarajuće analize simulirali s dovoljno realizma postupak evakuacije ljudi iz tunela u slučaju požara, još uvijek postoje neke točke interesa koje vrijedi istražiti.

Potrebna su daljnja istraživanja kako bi se omogućila konačnija analiza zaštite od požara u tunelima. To bi trebalo uključivati više scenarija požara (npr. Izgaranje cisterne) i ponašanje korisnika (npr. Ponašanje osoba s invaliditetom), kao i detaljniju analizu učinka parametara požara na postupak bijega, kako bi se procijenila kritična udaljenost od požara za sigurna evakuacija u svim scenarijima. Također bi trebalo bolje istražiti brze i pouzdane sustave za suzbijanje ili sustave za kontrolu dima. Stoga bi buduće studije trebale omogućiti ovaj dodatni razvoj.



## 5. ZAKLJUČAK

U radu je obrađena tematika vezana uz požare u tunelima, požari u tunelima često nadmašuju požare na nekim drugim objektima te imaju veću smrtnost. Njihovo gašenje važno je za daleko veći broj problema nego kada su u pitanju požari na razini. Uvjeti za uspješno gašenje svih požara su specifični i daleko zahtjevniji od ostalih požara.

Materijalne štete uzrokovane požarima posljednjih su godina dosegle zabrinjavajuću razinu iu stalnom su porastu. Požare nije moguće u potpunosti eliminirati, a najučinkovitiji način zaštite dobara i smanjenja materijalne štete je poduzimanje odgovarajućih zaštitnih mjera.

Za poduzimanje odgovarajućih mjera zaštite od požara moraju se poznavati uzroci požara i opasnosti od požara, ako se uzroci požara otklone, opasnosti od požara svede na najmanju moguću mjeru, osigurava se dovoljno sredstava i uređaja za gašenje požara te osposobimo osoblje za rukovanje uređajima i znači, tada se postiže cilj zaštite od požara tj. smanjenje štetnog djelovanja požara. Ovu vrstu zaštite od požara možemo definirati kao skup mjera i radnji normativne, upravne, organizacijske, tehničko-tehnološke i druge prirode koje se organiziraju i provode na svim mjestima i objektima koji su izloženi opasnosti od požara.

Ispunjavanjem nekoliko potrebnih uvjeta za uspješno gašenje stvara se mogućnost za kvalitetniji rad u akciji gašenja, a time i smanjenje loših posljedica. Razlikujemo da su požari jedno, a podmetanje požara drugo. Požari nastaju prirodnim putem (npr. visoke temperature, koje mogu uzrokovati požar), a dok podmetanje požara predstavlja ljudsku ulogu u požaru (npr. podmetanje požara u nekim zgradama). Osim toga, značajan aspekt ovakvog načina ispoljavanja je nanošenje znatne materijalne štete ili potpuno uništenje objekta, ali i stvaranje publiciteta i unošenje straha u širu javnost.

Nadalje, tijekom požara u tunelu razvija se ogromna količina topline. Toplina koja se razvija može se raspršiti samo sporo zbog oblika strukture i okolnog tla i stijena. Stoga se na mjestu požara u konstrukciji mogu formirati značajne vrijednosti temperature zraka. Međunarodna istraživanja pružaju vrijedne informacije o evoluciji toplinske mase na temelju teoretskih pretpostavki u malim ili velikim testovima.

Razina sigurnosti u europskim tunelima znatno je povećana primjenom sigurnosnih standarda. Istraživanje psihološke sigurnosti s tim u vezi uvijek je težilo daljnjem poboljšanju sigurnosti korisnika zahvaljujući empirijskim istraživanjima.

S jedne strane, ideja je smanjiti vjerojatnost nesreća ili drugih kritičnih događaja (primarna prevencija). Drugo, opseg štete (sekundarna prevencija) mora biti minimiziran za korisnike ako dođe do opasnog incidenta.

Primjeri za primarnu prevenciju su sustavi upozorenja na umor, koji upozoravaju vozača na znakove pospanosti, koji se mogu sve češće pojaviti u monotonim okruženjima kao što su tuneli. Korisnici tunela za obuku mogu se klasificirati i kao primarna i kao sekundarna prevencija. Daljnji važni aspekti istraživanja psihološke sigurnosti je istraživanje društvenih utjecaja, drugim riječima kako ljudi međusobno utječu jedni na druge u kritičnim situacijama ili razvoj složenih modela ponašanja za predviđanje ponašanja s ciljem optimizacije sigurnosnih mjera.

## LITERATURA

- [1] Blažević S., Paluh M. (2007) Spašavanje iz dubina i s visina“, Hrvatska vatrogasna zajednica, Zagreb,
- [2] Čačić, L. (1998) European Agreement concerning the international carriage of dangerous goods by road (ADR) and protocol of signature, Volume I, Volume II, UN, New York and Geneva,
- [3] Drakulić, M. (2006) Djelovanje sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela u uvjetima požara, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [4] Heskestad G (2003) Extinction of gas and liquid pool fires with water spray. Fire Safety Journal 38, str. 301–317
- [5] Quintiere J.G., Su G.Y., N. S (2007) Physical scaling for water mist fire suppression – a design application. International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes 9 (2), str. 87–108
- [6] Pavelić, Đ.(2011) Mjere sigurnosti i zaštite u skladištima s eksplozivnim tvarima i predmetima Sigurnost 53 (4) 387 – 388,
- [7] Popović, Ž. i dr. (2006) Priručnik za osposobljavanje vatrogasnih dočasnika i časnika, Zagreb,
- [8] Škrtić, B. (2013) Suvremeni sustav vatrodojave i gašenje požara u tunelu, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac,
- [9] Šmejkal Z. (2002) Vatrogasna vozila, Hrvatska vatrogasna zajednica, Zagreb,
- [10] Todorovski Đ. (2015) Izvješće i analiza vatrogasne intervencije“, PowerPoint prezentacija, kolegij Vatrogasna taktika, Veleučilište u Karlovcu,
- [11] Višnjić, V. (2011) Analiza razvoja požara u cestovnim tunelima, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb.