

Mere bezbednosti saobraćaja u transportu opasne robe kroz tunele

Road safety measures in the transport of dangerous goods through tunnels

Aleksandar Gošić^{1}, Siniša Sremac², Dragan Smiljanić³*

¹Akademija tehničko-vaspitačkih strukovnih studija Niš, Odsek Vranje, Filipa Filipovića 20, Vranje, Srbija / Academy of Technical and Educational Vocational Studies Niš, Section Vranje, Vranje, Serbia

^{2,3}Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, Srbija / University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, Serbia

*Autor za prepisku / Corresponding author

Rad primljen / Received: 08.04.2023, Rad prihvaćen / Accepted: 31.05.2023.

Sažetak: Transport opasne robe u drumskom saobraćaju predstavlja oblast od izuzetnog značaja za privredu pa samim tim zaokuplja sve veću pažnju naučne i stručne javnosti. Oblast transporta opasne robe uređena je propisima na međunarodnom i nacionalnom nivou. Iako se preduzimaju definisane mere, u transportu opasne robe dešavaju se vanredni događaji. Postoje metode za procenu rizika tokom transporta opasne robe, na kojima se zasniva metodologija izbora trase za transport opasne robe. Posebnu pažnju zaokuplja procena rizika za transport opasne robe kroz tunele. I pored odgovarajućeg nivoa osposobljenosti i veština, čovek kao faktor bezbednosti ima najviši uticaj na pojavu i nastanak akcidentne situacije, usled neadekvatnog činjenja ili nečinjenja propisanih aktivnosti tokom transporta opasne robe kroz tunele. Radi sprečavanja akcidentnih situacija, razvijaju se sistemi u tunelima kojima se smanjuju posledice eventualnog vanrednog događaja. U ovom radu dat je pregled osnovnih normativnih dokumenata kojima se uređuje oblast minimalnih bezbednosnih zahteva za tunele na evropskoj putnoj mreži, dat je literarni pregled sadržaja koji obrađuju oblast transporta opasne robe kroz tunele i data su zaključna razmatranja u vezi sa primenom mera bezbednosti saobraćaja u transportu opasne robe kroz tunele.

Ključne reči: bezbednost saobraćaja, transport opasne robe, tunel.

Abstract: The transport of dangerous goods in road transport is an area of exceptional importance for the economy, and thus it is attracting more and more attention from the scientific and professional public. The field of transportation of dangerous goods is governed by regulations at the international and national level. Although defined measures are taken, extraordinary events occur in the transport of dangerous goods. There are methods for risk assessment during the transport of dangerous goods, on which the methodology for choosing a route for the transport of dangerous goods is based. Special attention is paid to the risk assessment for the transport of dangerous goods through tunnels. In addition to the appropriate level of training and skills, man as a safety factor has the highest influence on the appearance and emergence of an accident situation, due to inadequate performance or failure to perform prescribed activities during the transport of dangerous goods through tunnels. In order to prevent accidental situations, systems are being developed in tunnels that reduce the consequences of a possible emergency event. In this paper, an overview of the basic normative documents regulating the field of minimum safety requirements for tunnels on the European road network is given, a literary review of the content dealing with the transport of dangerous goods through tunnels is given, and concluding considerations are given regarding the application of traffic safety measures in transport dangerous goods through tunnels.

Keywords: road safety, transportation of dangerous goods, tunnel.

¹orcid.org/0000-0002-7592-6786, e-mail: aleksandar.gosic@akademijanis.edu.rs

²orcid.org/0000-0002-3641-5107, e-mail: sremacs@uns.ac.rs

³orcid.org/0000-0002-3609-3283, e-mail: targija996@gmail.com

UVOD / INTRODUCTION

Opasne materije su sirovine, poluproizvodi ili gotovi proizvodi, koje zbog karakterističnog hemijskog sastava i određenih svojstava imaju niz poželjnih osobina za svrsishodnu primenu. Međutim, u nekontrolisanim uslovima mogu da izazovu posledice opasne i štetne po ljude, životinje, materijalna dobra, vodotokove, vegetaciju ili generalno za čitav ekosistem. Opasna roba definiše se kao predmet ili materija čiji je transport zabranjen ili dozvoljen ako se obavlja pod uslovima određenim Međunarodnim sporazumom za drumski prevoz opasne robe. Transport opasne robe u drumskom saobraćaju predstavlja oblast od izuzetnog značaja za privredu pa samim tim zaokupljuje sve veću pažnju naučne i stručne javnosti.

Postoje metode za procenu rizika tokom transporta opasne robe, na kojima se zasniva metodologija izbora trase za transport opasne robe. Posebnu pažnju zaokupljuje procena rizika za transport opasne robe kroz tunele. Prilikom procene rizika u obzir se uzima veliki broj faktora koji posredno i neposredno utiču na realizaciju transporta, a koji se iskazuju odgovarajućim parametrima.

U ovom radu dat je pregled osnovnih normativnih dokumenata kojima se uređuje oblast minimalnih bezbednosnih zahteva za tunele na evropskoj putnoj mreži, dat je literarni pregled sadržaja koji obrađuju oblast transporta opasne robe kroz tunele i data su zaključna razmatranja u vezi sa primenom mera bezbednosti saobraćaja u transportu opasne robe kroz tunele.

1. MATERIJALI I METODE / MATERIALS AND METHODS

1.1. *Transport opasne robe kroz tunele / Transport of dangerous goods through tunnels*

Drumski saobraćaj (posebno saobraćaj robe veće mase) u tunelima kontinuirano je rastao tokom mnogo godina. Pored toga, uz poboljšanje tehnika izgradnje, tuneli su sve isplativije inženjersko rešenje u mnogim zemljama, ne samo za prelazak preko terena geografski teških karakteristika, već i za prolazak kroz urbana područja sa minimalnim uticajem na lokalnu životnu sredinu. Dok se većina tehnika koje se tiču izgradnje tunela i bezbednosti stalno poboljšavaju, problemi koje izaziva opasna roba još uvek nisu rešeni na zadovoljavajući način (OECD, 2001).

Strme planinske strane, uzane doline i uslovi loše konfiguracije terena čine konstruisanje puta težim i skupljim. Radi smanjenja troškova konstrukcije puta, mnogi putevi, koji se nalaze na nepristupačnim terenima uzani su, sa velikim brojem krivina i sa strmim nagibima. Ovakvi uslovi doprinose povećanju stope nezgoda. U takvim uslovima, obično se

vrš izbor izgradnje tunela na putevima radi postizanja bolje mobilnosti i povećanja bezbednosti saobraćaja. U poređenju sa nadzemnim putevima, putevi u tunelima imaju niz karakteristika, koji mogu da povećaju, ali i da smanje nivo bezbednosti saobraćaja (Elvik i dr., 2009).

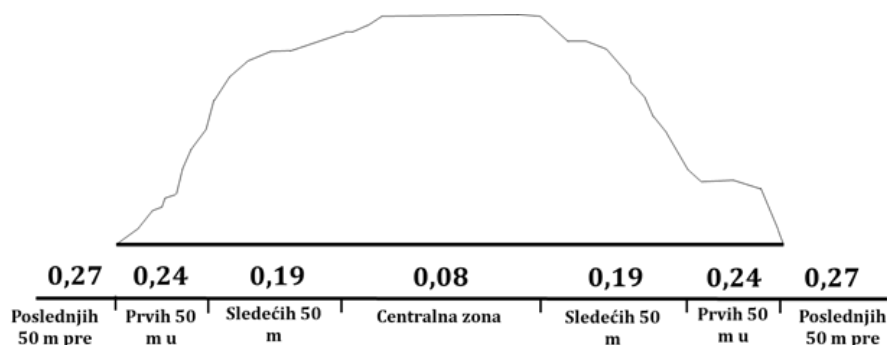
Faktori koji čine put u tunelu bezbednijim od nadzemnog puta su (Elvik i dr., 2009): Putevi u tunelima nemaju raskrsnice ili pristupne saobraćajnice; Obično je nizak nivo ili ne postoji pešački ili biciklistički saobraćaj u tunelima; Putevi u tunelima imaju blaža ravnjanja u odnosu na nadzemne puteve (manje oštih krivina i strmih nagiba); Putevi u tunelima nisu izloženi lavinama ili klizištima; i Putevi u tunelima nisu izloženi kiši i složenim zimskim uslovima saobraćaja.

Faktori koji čine put u tunelu manje bezbednijim od nadzemnog puta su (Elvik i dr., 2009): Ograničen prostor, mogućnosti za manevrisanje su male; Ne postoji dnevna svetlost i osvetljenost se dramatično menja prilikom ulaska-izlaska iz tunela; Pristup svežem vazduhu je smanjen, stoga pare, magla i izduvni gasovi mogu smanjiti vidljivost; U slučaju nezgode ili požara, put za evakuaciju može biti blokiran i spasavanje može biti teže u odnosu na nadzemne puteve.

Brojne studije rađene su u Norveškoj u vezi sa stopom nezgoda u tunelima i faktorima koji utiču na njih. Na osnovu ocena stope nezgoda u tunelima, dobijen je grafik broja nezgoda sa povređenima po milion vozilokilometara za različite zone u tunelima (slika 1).

Stopa nezgoda sa povređenima veća je u prelaznim zonama između tunela i nadzemnih puteva. Jedan od razloga jeste i činjenica da se te zone obično nalaze u senci, pa su stoga izložene uslovima koji razvijaju klizav kolovoz, u odnosu na zone koje su izložene sunčevoj svetlosti. Relativno visok nivo rizika na ulazu ili izlazu iz tunela može se objasniti činjenicom da se vid nije prilagodio promeni uslova vidljivosti prilikom ulaska ili izlaska iz tunela. Osvetljenost u tunelu je najveća na početku i na kraju tunela, a smanjuje se u centralnoj zoni.

Bezbednost u tunelu obuhvataju sledeće mere, koje su istraživane u studijama u Norveškoj (Elvik i dr., 2009): izbor da li će put biti nadzemni ili izgrađen u tunelu; izbor dužine tunela; izbor širine tunela; izbor nagiba u tunelu; izbor radijusa horizontalnih krivina u tunelu; osvetljenje tunela; i izbor između jedne cevi (sa dvosmernim saobraćajem) ili dve cevi (jednosmerni saobraćaj u svakoj cevi). Ovim studijama nisu bili obuhvaćeni uticaji ventilacije u tunelima, izlazi za evakuaciju, sistemi praćenja saobraćaja putem kamera, jer nije identifikovan njihov uticaj na nezgode.



Slika 1 – Broj nezgoda sa povređenima po milion vozilo km za različite zone u tunelima
Figure 1 - Number of accidents with injuries per million vehicle km for different zones in tunnels

Izvor / Source: (Elvik et al., 2009)

Na osnovu rezultata istraživanja, zaključeno je da su putevi u tunelima bezbedniji u odnosu na nadzemne puteve u gradovima. U manje naseljenim oblastima i na autoputevima nema statistički značajne razlike u odnosu na nivo bezbednost na putevima u tunelima. Osvetljenost u tunelu, proširenje tunela i smanjenje nagiba u tunelima doprinose povećanju bezbednosti u tunelima. Ovo se odnosi i na tunele veće dužine, zbog činjenice da prelazne

zone doprinose nižoj stopi nezgoda u dužim tunelima u odnosu na kraće (Elvik i dr., 2009).

Evropska organizacija za ekonomsku saradnju i razvoj (OECD) izdala je izveštaj i definisala smernice za bezbednost transporta opasne robe u tunelima (OECD, 2001). Ovim smernicama definisana je lista mera za smanjenje rizika tokom transporta opasne robe kroz tunele, prema njihovoj svrsi (tabela 1).

Tabela 1 – Lista mera za smanjenje rizika tokom transporta opasne robe kroz tunele
Table 1 - List of risk reduction measures during the transport of dangerous goods through tunnels

MERE ZA SMANJENJE VEROVATNOĆE NASTANKA AKCIDENTA		
Mere koje se odnose na dizajn tunela i održavanje		
Poprečni presek tunela i vizuelni dizajn	Ravnanje Osvetljavanje tunela (uobičajno)	Održavanje Površina puta (trenje)
Mere koje se odnose na saobraćaj i vozila		
Ograničenje brzine Zabrana preticanja	Praćenje Odstojanje između vozila	Provera vozila
MERE ZA SMANJENJE POSLEDICA AKCIDENTA		
Uzbunjivanje, informisanje, komunikacija operatera i hitnih službi		
Televizija zatvorenog pristupa (CCTV) Automatska detekcija incidenta	Automatska detekcija požara Radio komunikacija (službe)	Automatska identifikacija vozila Telefon za hitne pozive
Komunikacija sa korisnicima		
Telefoni za hitne pozive Radio komunikacija (korisnici)	Znakovi za uzbunjivanje	Zvučnici
Evakuacija ili zaštita korisnika		
Izlazi u slučaju opasnosti Kontrola prisustva dima	Osvetljavanje (u slučaju opasnosti) Oprema otporna na vatru	Upravljanje otkazima
Smanjenje veličine nezgode		
Protivpožarna oprema Timovi za spasavanje	Odvod tečnosti Površina puta (neporozna)	Akcioni plan u hitnim slučajevima Praćenje
Smanjenje posledica po tunel		
Struktura otporna na vatru	Struktura otporna na eksploziju	

Izvor / Source: (OECD, 2001)

Ovim smernicama definisana je sveobuhvatna analiza postupka definisanja mera bezbednosti u tunelima prilikom transporta opasne robe. Prema ovom izveštaju, primena propisa često je otežana zbog nerazumevanja istih. Izvršena je podela svih akcidenata u tri grupe (OECD, 2001): eksplozija,

oslobađanje otrovnih gasova ili isparljivih otrovnih tečnosti i požar. Primena modela kvantitativne procene rizika (QRAM) otežana je zbog uticaja velikog broja faktora i parametara koji utiču na verovatnoću nastanka incidenta prilikom transporta opasne robe, kako unutar, tako i van tunela. Primena modela po-

drške odlučivanju doprinosi objektivnom sagledavanju i kvantifikaciji pojedinačnih faktora koji utiču na rizik. Za svaki element u okviru mera definisani su postupci i procedure koje se primenjuju radi smanjenja verovatnoće nastanka i posledica akcidenta.

Pretragom FACTS baze podataka o akcidentima u tunelima (pri čemu je za aktivnost izabran drumski transport, a za lokaciju izabran tunel), dobijeno je ukupno 28 akcidenta u periodu od 1949. do 2008. godine (FACTS, 2023). Ukupno 23 akcidenta dogodila su se do 2001. godine (kada su donete smernice OECD). Od 28 akcidenta, u 22 je vršen transport opasnih materija klase 3 (zapaljive tečne materije), u po dva akcidenta vršen je transport klase 2 (gasovi) i klase 8 (nagrizajuće materije), a u po jednom akcidentu vršen je transport klase 4.1 (zapaljive čvrste materije) i klase 9 (ostale opasne materije i predmeti). U 12 akcidenta procenjena je odgovornost čoveka, u dva akcidenta - tehnička greška, u jednom akcidentu - greška rukovođenja, a za 13 akcidenta navedeno je da nisu poznati uzroci nastanka akcidenta. U devet akcidenta bilo je poginulih i povređenih, u tri samo poginulih, u pet samo povređenih, a u 11 akcidenta nije bilo poginulih i povređenih, ali je pričinjena materijalna šteta. Najveći broj akcidenta – po pet, zabeleženo je u Holandiji i Francuskoj i četiri akcidenta u Švajcarskoj.

1.2. Normativna regulativa u oblasti transporta opasne robe kroz tunele / Normative documents in the field of transport of dangerous goods through tunnels

Pri primeni ograničenja za prolazak vozila sa opasnom robom kroz tunele, nadležni organ mora svrstati drumski tunel u jednu od kategorija tunela utvrđenih Sporazumom o međunarodnom drumskom prevozu opasne robe – ADR. Pri tome treba voditi računa o karakteristikama tunela, proceni rizika uključujući pogodnost i raspoloživost alternativnih puteva i vidova saobraćaja i imajući u vidu upravljanje saobraćajem. Isti tunel može biti svrstan u više kategorija, npr. u zavisnosti od časova u toku dana ili dana u nedelji itd.

Kategorizacija se bazira na pretpostavci, da u tunelu postoje tri glavne opasnosti, koje mogu dovesti do mnogobrojnih žrtava ili ozbiljne štete na građevini tunela od (ADR, 2021): eksplozije; oslobađanja otrovnih gasova ili isparivih otrovnih tečnosti; i požara.

Tuneli su svrstani u sledećih pet kategorija (ADR, 2021):

- *Tuneli kategorije A:* Nema ograničenja za transport opasne robe;

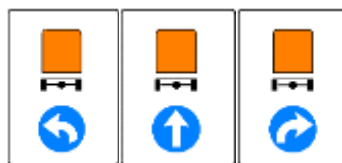
- *Tuneli kategorije B:* Ograničenja za transport opasne robe koja može dovesti do velikih eksplozija;
- *Tuneli kategorije C:* Ograničenja za transport opasne robe, koja može da dovede do jako velike eksplozije, velike eksplozije ili do obimnog oslobađanja otrovnih materija;
- *Tuneli kategorije D:* Ograničenja za transport opasne robe koja može da dovede do jako velike eksplozije, do velike eksplozije, do obimnog oslobađanja otrovnih materija ili do velikog požara;
- *Tuneli kategorije E:* Ograničenja prevoza za svu opasnu robu sa izuzetkom one koja u koloni (15) tabele A poglavlja 3.2 ADR ima simbol (-) i za svu opasnu robu pakovanu u ograničenim količinama, ako količina koja se transportuje premašuje 8 t ukupne bruto mase po transportnoj jedinici.

Zabrane za tunele i alternativne puteve ugovorne strane moraju označavati pomoću znakova i signala. U ovu svrhu mogu se koristiti znaci C, 3h (slika 2) i D, 10a, 10b i 10c (slike 3, 4 i 5) i signali prema Bečkoj Konvenciji o drumskim saobraćajnim znacima i signalima (ADR, 2021).



Slika 2 - Saobraćajni znak C, 3h – Zabranjen ulaz za vozila koja prevoze opasne terete za koje su propisani posebna znakovi

Figure 2 - Traffic sign C, 3h - No entry for vehicles carrying dangerous goods for which special signs are prescribed (ECE/TRANS/196, 1968)



Slika 3, 4 i 5 – Saobraćajni znak D, 10a, 10b, 10c – Obavezan smer za vozila koja prevoze opasnu robu
Figures 3, 4 and 5 - Traffic sign D, 10a, 10b, 10c - Compulsory direction for vehicles transporting dangerous goods (ECE/TRANS/196, 1968)

Ograničenja za tunele se primenjuju za transportne jedinice za koje se zahteva obeležavanje narandžastim tablama u skladu sa ADR, izuzev za transport opasne robe koja je obeležena podatkom "(-)" u koloni (15) tabele A poglavlja 3.2 ADR.

Ograničenja za tunele ne primenjuju se, ako se opasna roba transportuje pod izuzećem u skladu sa poglavljem 1.1.3 ADR, izuzev ako su transportne jedinice koje transportuju takve robe, obeležene u skladu sa poglavljem 3.4.13, u zavisnosti od poglavlja 3.4.14 ADR.

Evropska direktiva koja je najznačajnija u ovoj oblasti je Direktiva 2004/54/EC od 29. aprila 2004. godine o minimalnim zahtevima bezbednosti za tunele na Transevropskoj mreži puteva. Ova Direktiva ima za cilj da obezbedi minimalni nivo bezbednosti za učesnike u saobraćaju u tunelima na Transevropskoj putnoj mreži sprečavanjem kritičnih događaja koji mogu ugroziti ljudski život, životnu sredinu i tunnelske instalacije, kao i pružanjem zaštite u slučaju nezgode. Mere bezbednosti za tunele definisane ovom direktivom mogu se podeliti na četiri grupe (Directive, 2004): osnova za odlučivanje o merama bezbednosti; infrastrukturne mere; mere koje se odnose na rad tunela; i akcije informisanja.

Zakonom o putevima u Republici Srbiji uređeno je da se upravljanje saobraćajem obezbeđuje, pored ostalog i upotrebom sigurnosne opreme u tunelima. Posebnim poglavljem ovog zakona definisani su bezbednosni zahtevi za tunele duže od 500 m. Prema odredbama zakona, Ministarstvo nadležno za poslove saobraćaja je organ nadležan za ispunjenje bezbednosnih zahteva, a posebnim propisom (pravilnikom) definišu se minimalni bezbednosni zahtevi koje moraju da ispunjavaju tuneli. Takođe, upravljač javnog puta određuje se za upravnika tunela i odgovoran je za izradu nezavisnih projekata mapiranja rizika, kojima se utvrđuju svi faktori koji utiču na bezbednost saobraćaja u tunelu, a naročito karakteristike saobraćajnog toka i prognozirani dnevni broj teretnih vozila. Upravnik tunela dužan je da imenuje savetnika za bezbednost u tunelima na javnom putu kojim upravlja, koji je nezavisan pri donošenju svih odluka po pitanju bezbednosti u tunelu (Zakon o putevima, 2018).

1.3. Istraživanja u oblasti transporta opasne robe kroz tunele /

Researches in the field of transport of dangerous goods through tunnels

Istraživanje sprovedeno u Grčkoj (Kalogeraki, Antoniou, 2021) imalo je za cilj poboljšanje postojećeg modela kvantitativne procene rizika (QRAM – Quantitative Risk Assessment Model), utvrđivanje prepreka u saradnji upravnika tunela sa hitnim službama, identifikacija metoda prenošenja stečenih iskustava i naučenih lekcija radi budućih procena rizika i određivanje dobre prakse u zahtevima obuke lica koja procenjuju rizik. Istraživanje je sprovedeno primenom Delfi metode sa devet stručnjaka kroz dva

kruga anketiranja. Najčešće pronađene poteškoće, na osnovu ocene stručnjaka, odnosile su se na: prikupljanje potrebnih podataka za analizu rizika; poteškoće u saradnji između hitnih službi i upravljača tunela; i nedostatak kvalifikovanog osoblja. Na osnovu rezultata ove Delphi studije, date su preporuke za poboljšanje primenjenog QRAM pristupa, za olakšavanje saradnje između upravnika tunela i hitnih službi, za prenošenje stečenog iskustva i naučenih lekcija i za unapređenje obuke procenitelja rizika.

Benekos i Diamantidis u svom istraživanju (Benekos, Diamantidis, 2017) daju pregled i kratku diskusiju metoda za procenu rizika transporta opasne robe kroz tunele u skladu sa minimalnim infrastrukturnim zahtevima Evropske direktive 2004/54/EC. Primenjene procedure procene rizika u radu su: polukvantitativni pristup (matrica rizika) i model kvantitativne procene rizika transporta opasne robe (QRAM). Autori navode dva kriterijuma prihvatanja rizika: ALARP (As Low As Reasonably Practicable – što manje praktično izvodljivo) i kriterijum prihvatanja rizika procene modela kvantitativne procene rizika transporta opasne robe. U daljem istraživanju izvršen je prikaz studije slučaja – procena rizika na tunelu koji je izgrađen u skladu sa Direktivom 2004/54/EC. Na osnovu rezultata istraživanja, definisane su preporuke za mere bezbednosti. Bezbednosne mere mogu se klasifikovati u dve glavne kategorije (prema smernicama OECD iz 2001. godine): mere prevencije, koje smanjuju verovatnoću nezgode; i mere ublažavanja, koje smanjuju posledice udesa. Razmatrane sigurnosne mere/sistemi su: (1) ugradnja zvučnika; (2) sistemi za kontrolu brzine; (3) sistemi kontrole udaljenosti; (4) sistem zatvaranja kapije na ulazu u tunel; i (5) ugradnja led sistema za navođenje. Od navedenih mera bezbednosti/sistema, sistemi kontrole brzine i daljine najvažniji su sistemi. Svaki od njih može smanjiti verovatnoću nezgode, a samim tim i stopu nezgoda do 60%. Na osnovu relativnog rangiranja mera bezbednosti, sistemi za kontrolu brzine zauzimaju prvo mesto u pogledu njihove efikasnosti u smanjenju rizika, ali su i najskuplji. Sistemi koji imaju znatno nižu cenu, kao što je sistem zatvaranja na ulazu u tunel, mogu smanjiti rizik za približno 1/3 (tj. uticaj na vreme za zaustavljanje saobraćaja), međutim, njihova efikasnost na smanjenje rizika je predmet rasprave među praktičarima.

Lundin i Antonsson u svom istraživanju (Lundin, Antonsson, 2019) prikazuju metod za kategorizaciju švedskih putnih tunela prema ADR 2017, a na osnovu analize rizika. Metode za kategorizaciju fokusiraju se na aspekte koji se odnose na rizik i bezbednost. Odluke u vezi sa kategorijom tunela, međutim, moraju takođe uzeti u obzir i druge

aspekte, koji su deo pitanja rizika i bezbednosti. Ova studija pretpostavlja da se ograničenje prolaska opasne robe kroz drumske tunele sprovodi samo radi poboljšanja bezbednosti tunela, odnosno smanjenja nivoa rizika za ljude i objekte zaštićene u neposrednoj blizini tunela, čiji je nivo rizika pod direktnim uticajem lokacije i konfiguracije tunela. Osnovna pitanja koja treba razmotriti su:

- Koja kategorija tunela je prikladna s obzirom na osnovni rizik i aspekte sigurnosti? Ovo uključuje bezbednost tunela, ali i bezbednost transporta opasne robe drumom uopšte; i
- Koja kategorija tunela je poželjna s obzirom na ukupnu društvenu procenu uzimajući u obzir svaki relevantan aspekt odluke? Ti aspekti se mogu sastojati od socio-ekonomskih procena, praktičnog i političkog razmatranja itd.

Autori ovog istraživanja predlažu tri nivoa (koraka) prilikom određivanja kategorije tunela: *Nivo 1: Pojednostavljena metoda analize rizika* – Korak 1: provera opštih uslova, Korak 2: klasa rizika tunela, Korak 3: tehnički standard, Korak 4: kategorizacija zasnovana na riziku, *Nivo 2: Opsežna metoda analize rizika* i *Nivo 3: Stručna procena*. Prednosti korišćenja ekspertske procene u poređenju sa metodom analize rizika su u tome što je to obično prilično jednostavan proces i zahteva manje resursa. Međutim, nedostaci su mnogi. Na primer, teško je izvršiti procenu na sistematski način i predstaviti činjenice koje stoje iza procene. Dokumentovanje ekspertske procene je takođe važno, neki primeri onoga što dokumentacija može da sadrži su: Sastav ekspertske grupe, svrha i cilj procene i dostupne činjenice. Ključno je da ekspertska grupa ima neophodna znanja o tunelu i njegovoj okolini, kao i kompetentnost da izvrši procenu.

Prema modelu izbora optimalne rute razvijanom u Poljskoj (Bęczkowska, 2019), uzeta je pretpostavka da postoje tri ključna elementa koja utiču na nivo rizika: čovek, put i transportno sredstvo (vozilo). Pojam „put“ karakterišu različiti parametri: vrsta puta, ograničenje brzine, rastojanje, okolina i intenzitet saobraćaja. Karakteristike čoveka/vozača uključuju određene individualne karakteristike kao i organizaciju i parametre rada. Transportno sredstvo, odnosno vozilo – poluprikolica cisterna, analizira se prvenstveno sa tehničkog stanovišta. Ovi faktori su uzeti u obzir u modelu verovatnoće nesreće. Razvijeni model rizika je ograničen na transport tečnih goriva. Pod ovom pretpostavkom određeni su različiti scenariji udesa, a samim tim i veličina i vrsta nastalih gubitaka. Identifikovane su tri kategorije gubitaka: zdravlje ili život ljudi, okolina (ekološki) i ukupni finansijski gubici. Poseban osvrt prilikom

istraživanja izvršen je na vozača, njegovu efikasnost i umor. Nakon korišćenja heurističke lingvističke metode i ekspertske ocene, dobijeni podaci korišćeni su za određivanje optimalne rute za transport opasne robe. Za određivanje optimalne rute nisu korišćene metode Dijkstra algoritma, neuronske mreže ili genetski algoritmi, jer model pretpostavlja da se težina povezana sa umorom vozača menja tokom vremena, već je korišćen A* algoritam. Funkcioniše tako što izračunava najkraću rutu na osnovu cene već pređene rute i heurističke procene troškova preostale rute. Međutim, kvalitet rešenja dobijenih ovim algoritmom zavisi od kvaliteta heurističke funkcije i preciznosti njenog rada. Za potrebe verifikacije modela, implementiran je softverski program pod nazivom Safest Path Finder.

Weerheijm, Verreault i van der Voort istraživali su eksploziju gasa u tunelu (Weerheijm i dr., 2018). Ova studija ima za cilj da pokaže sposobnost procene verovatnoće paljenja prilikom scenarija eksplozije gasa u tunelima kao i procene rezultujućih fizičkih efekata kao što je nadpritisak. Modeli za disperziju gasa i naknadnu eksploziju razvijeni su od strane holandske organizacije za istraživanja TNO. Cilj razvoja modela je kombinacija modela disperzije sa verovatnoćom paljenja gorivog oblaka i rezultujućim fizičkim efektima. U ovoj studiji razmatran je tunel određene dužine, sa određenom brzinom ventilacije u smeru kretanja vozila i određenom gustinom vozila. Na određenoj lokaciji u tunelu i u određenom trenutku pretpostavlja se nezgoda u kojoj učestvuje teretno vozilo kojim se prevozi opasna roba. Od tog trenutka pa nadalje curenje rezultira oblakom koji se meša sa vazduhom i kreće se u smeru kretanja vozila. Razmatraju se i scenariji trenutnog i kontinuiranog oslobađanja, nakon čega sledi direktno ili odloženo paljenje. Studije slučaja jasno pokazuju sposobnost da se kvantifikuju posledice i verovatnoće za različite scenarije udesa. Kombinacija modela disperzije gasa, eksplozije gasa i paljenja je potrebna za izvođenje projektovanih opterećenja za tunele, za procenu rizika tunela i za razvoj bezbednosnih mera. Preporučuju se dalja istraživanja o uticaju vozila na disperziju gasa u tunelima, kao i o ograničenjima jednodimenzionog modela disperzije gasa. Da bi se napravila pouzdanija predviđanja verovatnoće paljenja, vrednosti dva relevantna parametra modela moraju biti validirane. Ovi parametri su verovatnoća paljenja jednog automobila koji ostaje u zapaljivoj smeši 1 s, kao i vreme kašnjenja paljenja.

Caliendo i Genovese izvršili su istraživanje rizika transporta vodonika kroz tunele u Italiji (Caliendo, Genovese, 2021). Istraživanja su bila usmerena na deflagraciju i detonaciju vodonika u različitim vrstama tunela. Rezultati istraživanja ukazuju na sledeće:

ventilacioni sistem smanjuje efekte deflagracije vodonika u smislu nadpritiska, kao i mogućnost eksplozije u slučaju curenja; deflagracije na otvorenom prostoru imale su manje posledica nego u skućenim prostorima; uočeno je značajno povećanje maksimalnog nadpritiska u blizini prepreka u tunelu usled refleksije udarnog talasa; skladištenje tečnog vodonika moglo bi biti bezbednije od skladištenja gasa u slučaju curenja, ali opasnije u slučaju katastrofalnog pucanja rezervoara; najteži događaj je eksplozija pare koja se širi u ključaloj tečnosti (prouzrokovano požarom) koji može izazvati smrtno slučajeve u 120 m radijusa; maksimalni toplotni tok, u zavisnosti od trajanja ispuštanja, smera vetra i brzine, prilikom izlivanja tečnog vodonika, može da iznosi 120 kW/m^2 u najgorem slučaju eksplozije; dužina plamena i zapaljiva zapremina povećavaju se kada je oslobađanje vodonika u blizini površine; povećanje otpornosti rezervoara za skladištenje vodonika na vatru može smanjiti veličinu rizika na prihvatljiv nivo. Za potrebe istraživanja korišćen je model QRAM, sa tri dodatna scenarija koja uključuju vozila koja prevoze tečni vodonik, stoga su bile potrebne promene u postojećem modelu uvođenjem dodatnog stabla događaja. U metodologiji istraživanja, pretpostavlja se da početni događaj koji dovodi do oslobađanja tečnog vodonika prati tri moguća tipa oslobađanja: trenutno, kontinuirano i kontinuirano iz rupe male veličine. U odnosu na svaki tip oslobađanja, postoje dve mogućnosti: paljenje ili bez paljenja (bez posledica). Paljenje može biti direktno ili odloženo. Na osnovu dobijenih rezultata, zaključeno je da se mnoge F/N krive nalaze unutar (ili ispod) ALARP (As Low As Reasonably Practicable – što manje praktično izvodljivo) regiona. Povećanjem dužine tunela, PGDS po traci, procenta i teških teretnih vozila i vozila za transport opasne robe, utvrđeno je da određene F/N krive leže iznad gornje granice ALARP regiona. Ovo ukazuje da se moraju preduzeti dodatne mere bezbednosti kako bi se smanjio nivo rizika. U smislu navedenih rezultata, može se primetiti da bi fluktuacija vodonika mogla povećati nivo rizika u tunelima za 2,66% i 27,35% (za oko 15% u proseku) u poređenju sa nivoom rizika koji odgovara saobraćajnim tokovima bez transporta vodonika. Neke potencijalne mere ili bezbednosne strategije u cilju smanjenja rizika od transporta vodonika takođe mogu biti: sprečavanje akumulacije vodonika u tunelima pomoću odgovarajućih ventilacionih sistema ili vodoničnih zamki na plafonu; omogućavanje drenaže tečnog vodonika; postavljanje putnih znakova (npr. ograničenja brzine, zabrana preticanja, bezbednosna udaljenost između vozila); i korišćenje sistema za praćenje i komunikaciju za hitne službe.

2. PREDLOG MERA BEZBEDNOSTI U TRANSPORTU OPASNE ROBE U TUNELU / PROPOSALS FOR SAFETY MEASURES IN THE TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS THROUGH TUNNELS

Transport opasne robe učestvuje u sve većem obimu u ukupnom transportu tereta u svetu. Realizaciju svakog od transportnih procesa sa opasnom robom prati određeni rizik od neželjenog događaja sa štetnim posledicama koji mogu nastati usled izlivanja opasne materije (iz transportnog suda ili pakovanja), a potom njenog štetnog dejstva, srazmerno klasi opasnosti kojoj ona pripada (eksplozija, požar, otrovna isparenja, radijacija i dr).

Štete koje su nanete akcidentima pri transportu opasne robe, mogu imati ogromne negativne posledice po zdravlje i život ljudi, zagađenje okoline, uništavanje prirodnih bogatstava, oštećenje materijalnih dobara, rušenje industrijskih objekata, zgrada za stanovanje, puteva, utovarno-istovarnih stanica, itd.

Rizik se može smanjiti ukoliko se preduzmu sve potrebne mere i aktivnosti, a jedan od ključnih koraka jeste upravljanje rizikom pri transportu opasne robe. Radi sprečavanja akcidentnih situacija, ali i ublažavanja posledica, ako do njih dođe, potrebno je koristeći sve raspoložive podatke izvršiti procenu rizika koji nosi određeni proces. Postoji veliki broj tehnika i metoda koje utiču na izbor metodologije za upravljanje rizikom od nastanka akcidentne situacije, a koje služe za identifikaciju opasnosti i procenu rizika. Tom prilikom, veoma je bitno uvažiti faktore koji mogu uticati na realizaciju transporta opasne robe, od kojih se nivo rizika može posebno izdvojiti.

Na osnovu sprovedenih istraživanja, uvažavajući i troškove primene mera, moglo bi se definisati nekoliko elemenata za unapređenje bezbednosti transporta opasne robe kroz tunele, kao i pravci daljih istraživanja u ovoj oblasti, prema sledećem:

1. Formiranje baze podataka o pokazateljima tunela i saobraćaja na nacionalnom nivou – kao osnovi problem ističe se postojanje i prikupljanje informacija potrebnih za podršku odlučivanju u vezi sa transportom opasne robe kroz tunele, kao što su karakteristike tunela, prosečni godišnji dnevni saobraćaj, procenat učešća teških teretnih vozila u saobraćaju.

2. Unapređenje pristupa prilikom korišćenja modela kvantitativne procene rizika (QRAM) – ovim modelom definisano je 13 scenarija, sa mogućnošću proširenja raspoloživim podacima. Prilikom procene rizika, potrebno je razmatranje svih relevantnih podataka, na koji način bi se izvršilo približavanje uslova simulacije i procene uslovima realne situacije.

3. Unapređenje saradnje organa upravljanja sa službama za hitne slučajeve – imajući u vidu pojedine poteškoće u saradnji, potrebno bi bilo razviti mehanizme bolje komunikacije i razmene informacija između upravnika tunela i službi za hitne slučajeve kroz periodične sastanke, seminare, vežbi ili ostale oblike organizovanja.

4. Prenošenje stečenog iskustva i naučenih lekcija – veoma bitan segment u unapređenju bezbednosti transporta opasne robe kroz tunele jesu naučene lekcije, iskustva i rezultati istraživanja. Radi smanjenja verovatnoće nastanka novih akcidenta, potrebno bi bilo razviti mehanizme prenosa stečenog iskustva i naučenih lekcija. Ovo je moguće, ne samo kroz obuku, vežbe, saradnju, već i formiranjem jedinstvenog registra o podacima o tunelu, saobraćaju i akcidentima koji su se dogodili sa (pronađenim ili procenjenim) uzrocima koji su usloveli nastanak akcidenta.

5. Primena savremenih tehničkih rešenja – tehnička sredstva i tehnologija koja bi se koristila u tunelima radi informisanja i upozoravanja učesnika u saobraćaju, praćenja trenutnog stanja u tunelu, pružanja informacija nadzornim organima, tehnička sredstva u konstrukciji tunela, trebalo bi da budu usklađena sa primenom savremenih rešenja.

6. Kategorizacija tunela – svaki tunel treba da bude kategorizovan u skladu sa međunarodnim sporazumima, radi pouzdanijeg planiranja transporta opasne robe i povećanja nivoa bezbednosti u tunelima.

7. Izbor optimalne rute za transport opasne robe – prilikom planiranja transporta opasne robe, potrebno je izvršiti izbor rute za transport, pri čemu bi bilo poželjno koristiti savremena informaciona softverska rešenja. Tom prilikom potrebno je uzimati u obzir sve neophodne informacije, kako bi procena pravaca bila sveobuhvatnija i bezbednija;

8. Obuka vozača vozila za transport opasne robe – u obuci vozača vozila za transport opasne robe posvetiti posebnu pažnju upravljanju vozila kroz tunele i merama bezbednosti koje sprovodi u slučaju vanrednih okolnosti;

9. Ispravnost vozila za transport opasne robe – prilikom planiranja kretanja vozila za transport opasne robe kroz tunele, posebnu pažnju posvetiti proveru ispravnosti vozila i prisustva propisane opreme vozila;

10. Održavanje – posebna pažnja trebalo bi da se posveti praćenju stanja vozila, ali i tehničkih sredstava u tunelu i upravljanju otkazima, odnosno pouzdanosti sistema.

ZAKLJUČAK / CONCLUSION

U ovom radu dat je pregled osnovnih normativnih dokumenata kojima se uređuje oblast minimalnih bezbednosnih zahteva za tunele na evropskoj putnoj mreži, dat je pregled literaturnih sadržaja koji obrađuju oblast transporta opasne robe kroz tunele i data su zaključna razmatranja u vezi sa primenom mera bezbednosti saobraćaja u transportu opasne robe kroz tunele.

Rizik objedinjuje pretnju, verovatnoću pojave neželjenog događaja, ranjivost, izloženost i posledice. Smanjenje verovatnoće pojave neželjenog događaja, ali i posledica neželjenog događaja, ako do istog dođe, vrši se primenom propisanih mera.

Mere bezbednosti transporta opasne robe kroz tunele mogu se svrstati u dve grupe: mere za smanjenje verovatnoće nastanka akcidenta (aktivna bezbednost) i mere za smanjenje posledica akcidenta (pasivna bezbednost). Faktori koji utiču na veličinu rizika mogu se svrstati u četiri grupe: čovek, tehnička i tehnološka sredstva, put i okolina. Rizik transporta opasne robe kroz tunele je dinamičan i periodično ga treba ispitivati i analizirati, zbog promene uslova pod kojima se odvija saobraćaj kroz tunele. Tom prilikom nije dovoljno ispitivati samo uslove u posmatranom tunelu, već je potrebno analizu proširiti i na alternativne pravce.

Čovek kao faktor ima najveći uticaj na veličinu rizika i samu bezbednost transporta opasne robe kroz tunele. Faze procesa upravljanja tokom sprovođenja mera bezbednosti su: planiranje (prikupljanje informacija i formiranje baze podataka, donošenje propisa, projektovanje tunela), organizovanje (obuka, izgradnja tunela), rukovođenje (praćenje stanja i izdavanje smernica), koordinacija (saradnja svih subjekata koji su uključeni u primeni mera, informisanje učesnika u saobraćaju i okoline) i kontrola (nadzor nad primenom definisanih mera).

Mere bezbednosti mogu biti stalne i promenljive. Stalne mere bezbednosti su one koje važe u svim uslovima, dok bi promenljive važile za konkretne slučajeve (u zavisnosti od konstrukcije tunela ili prilikom transporta različitih vrsti opasnih materija).

Zahvalnost / Acknowledgement

Rezultati prikazani u ovom radu su deo istraživanja projekta „Razvoj i primena savremenih metoda i tehnologija u nastavi i istraživanjima u saobraćaju i transportu”, osnovanog od strane Departmana za saobraćaj Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Republika Srbija.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] ADR, (2021). Izmene i dopune Tehničkih propisa koji su sastavni deo Sporazuma o međunarodnom drumskom prevozu opasne robe, aneksi A i B: *Službeni glasnik RS - Međunarodni ugovori*, broj 19/2021-1.
- [2] Bęczkowska, S. (2019). The method of optimal route selection in road transport of dangerous goods. *Transportation Research Procedia*, 40, 1252-1259. DOI:10.1016/j.trpro.2019.07.174.
- [3] Benekos, I., Diamantidis, D. (2017). On risk assessment and risk acceptance of dangerous goods transportation through road tunnels in Greece. *Safety Science*, 91, 1-10. DOI:10.1016/j.ssci.2016.07.013.
- [4] Caliendo, C., Genovese, G. (2021). Quantitative risk assessment on the transport of dangerous goods vehicles through unidirectional road tunnels: An evaluation of the risk of transporting hydrogen. *Risk Analysis*, 41(9), 1522-1539. DOI:10.1111/risa.13653.
- [5] Convention on Road Signs and Signals, ECE/TRANS/196, Vienna, 8 November 1968.
- [6] Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network, *Official Journal of the European Union*, L 167/39.
- [7] Elvik, R., Høye, A., Vaa, T., Sørensen, M. (2009). *The Handbook of Road Safety Measures*, Second Edition. Emerald Group Publishing Limited, Bingley, UK.
- [8] FACTS, (2023). www.factsonline.nl/browse-chemical-accidents-in-database, pristupljeno: 10.09.2022. godine.
- [9] Kalogeraki, M., Antoniou, F. (2021). Improving risk assessment for transporting dangerous goods through european road tunnels: a delphi study. *Systems*, 9(80), 1-19. DOI:10.3390/systems9040080.
- [10] Lundin, J., Antonsson, L. (2019). Road tunnel restrictions – Guidance and methods for categorizing road tunnels according to dangerous goods regulations (ADR). *Safety Science*, 116, 170-182. DOI:10.1016/j.ssci.2019.03.004.
- [11] OECD, (2021). Safety in tunnels – Transport of dangerous goods through road tunnels.
- [12] Pravilnik o minimalnim bezbednosnim zahtevima koje tunel na javnom putu mora da ispunjava sa gledišta bezbednosti saobraćaja, *Službeni glasnik RS*, broj 51/2019-62.
- [13] Pravilnik o načinu upravljanja tunelom, *Službeni glasnik RS*, broj 68/2019-30.
- [14] Sremac, S., Matijašević, M. (2021). *Transport opasne robe*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [15] Weerheijm J., Verreault, J., Van der Voort M.M. (2018). Quantitative risk analysis of gas explosions in tunnels. *Fire Safety Journal*, 97, 146-158. DOI:10.1016/j.firesaf.2017.06.003.
- [16] Zakon o putevima, *Službeni glasnik RS*, br. 41/2018-32, 95/2018-267 (dr. zakon).