

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA

DOKTORSKA DISERTACIJA

mag. IVAN KENDA

LJUBLJANA 2022

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA GEOTEHNOLOGIJO, RUDARSTVO IN OKOLJE

EMISIJE V PREDORU IN NJIHOV VPLIV NA OKOLJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

mag. IVAN KENDA

LJUBLJANA, april 2022

UNIVERSITY OF LJUBLJANA
FACULTY OF NATURAL SCIENCES AND ENGINEERING
DEPARTMENT OF MONTANISTICS

EMISSIONS IN THE TUNNEL AND THEIR EFFECT ON THE ENVIRONMENT

Ph. D. THESIS

mag. IVAN KENDA

LJUBLJANA, April 2022

PODATKI O DISERTACIJI

Število listov: 62

Število strani: 104

Število slik: 28

Število preglednic: 12

Število literaturnih virov: 34

Število prilog: 0

Študijski program: Interdisciplinarni doktorski študijski program Varstvo okolja

Smer: /

Komisija za zagovor:

Predsednica: *prof. dr. Urška Stanković Elesini*

Mentor: *prof. dr. Jakob Likar, UL NTF*

Somentorica: *prof. dr. Lučka Kajfež Bogataj, UL BF*

Član: *doc. dr. Primož Banovec, UL FGG*

Član: *izr. prof. dr. Željko Vukelić, UL NTF*

Član: *prof. dr. Ivan Eržen, UL MF*

Ljubljana,:

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Jakobu Likarju, somentorici prof. dr. Lučki Kajfež Bogataj in žal pred kratkim pokojnemu izr. prof. dr. Juriju Modicu, za vso strokovno in nesebično pomoč pri izdelavi doktorskega dela.

Zahvala gre tudi družini in vsem, ki so me vsa ta leta podpirali, mi pomagali in me spodbujali, da je pričujoče delo izdelano.

IZVLEČEK

Poleg emisij, ki nastajajo v cestnih predorih ob normalni vožnji, v primeru požara v predoru nastaja še emisija dima. Zmanjševanje koncentracij polutantov v predoru in njihovo širjenje izven predora, je zelo pomembno. Smer toka emisij in dima je v dvosmernih predorih težje predvidljiva, kot v predorih z enosmernim prometom, kjer je smer zračnega toka enolična, kar je posledica batnega učinka, saj se vozila in zračni tok gibljejo v isti smeri prometa.

V primeru požara v predoru, nastaja povratno gibanje, ki je nezaželeno, odvisno pa je od razmer in dejavnikov v in izven predora. Pomembna je tudi razdelitev zračnega toka v prečnem prerezu predora, ki se kaže v stratifikaciji, kot pomembnem pojavu, v odvisnosti od višine temperature in hitrosti zraka. Posebej je treba izpostaviti, da je stopnja ogroženosti ljudi, ki se v času požara nahajajo v predoru, zelo visoka, kar zahteva hitro in ustrezno ukrepanje nadzornih sistemov v smislu bistvenega zmanjšanja nevarnosti z mobiliziranjem t.i. požarnega scenarija.

Postavitev enotnega in splošno veljavnega modela je praktično neizvedljiva, zato si inženirji pomagamo z različnimi numeričnimi simulacijami, ki z uporabo numeričnih metod omogočajo izdelati za prakso sprejemljive približke, tako da so zagotovljene predpisane varnostne zahteve pri upravljanju s požari v različnih predorskih okoljih pri spremenljivih energijskih ravneh moči požarov, ki so posledica intenzivnega gorenja v zaprtih prostorih.

Da se v čim večji možni meri izognemo katastrofalnim posledicam požarov v cestnih predorih, je treba zagotoviti primerne in ustrezne prezračevalne razmere tako, da se najprej v računskih modelih nato pa v projektnih rešitvah in njihovih izvedbah, upoštevajo različni vplivni faktorji, med katere spadajo predvsem hitrosti zunanjih vetrov, intenzivnost in vrste prometnih tokov v predoru, vklapljanje in delovanje ventilatorjev z vsemi pripadajočimi zračilnimi objekti, ipd. Cilj je zagotoviti takšne prezračevalne razmere oz. stratifikacijo predorskega zraka, da ne pride do nevarnega mešanja svežega zraka in dima v času evakuacije ljudi iz predora ali evakuacije v, za te namene, izdelane prostore. Zato je v stroki uveljavljena bistvena zahteva, da se, če je le možno, gradijo dvocevni predori, kjer je v primerih izrednih dogodkov, možna evakuacija v sosednjo predorsko cev skozi prečnike, ki so zgrajeni v predpisanih vzdolžnih oddaljenostih.

Cilj raziskovanja je bil, da se s primernimi računskimi modeli in primerjavami s klasičnimi računskimi metodami, ki omogočajo simulacije različnih požarnih scenarijev in tehničnimi rešitvami prezračevanja v cestnih predorih zagotovi, da se vroči dimni plini pod stropom zadržujejo čim dlje, kar realno omogoča večini udeležencev varen umik iz predora ali sosednjo predorsko cev.

Ključne besede: cestni predor, vzdolžno prezračevanje, vetrovi s sunki, burja, CFD simulacije, Kennedyjeva enačba, stratifikacija, emisije, povratni tok, zastoj prometa

ABSTRACT

In addition to emissions from road tunnels during normal driving, smoke is also emitted in the event of a fire in the tunnel. Reducing the concentrations of pollutants in the tunnel and their spread outside the tunnel, in the portal areas, is very important. The direction of emission and smoke flow is more difficult to predict in two-way tunnels than in tunnels with one-way traffic, where the airflow direction is uniform due to the piston effect, as vehicles and airflow move in the same traffic direction.

In the case of a tunnel fire a backward movement occurs, that is undesirable and depends on the conditions and factors inside and outside the tunnel. The distribution of air flow in the cross section of the tunnel is also important, which is reflected in the stratification as an important phenomenon, depending on the height of the temperature and air velocity. It should be noted in particular that the level of threat to people who are in the tunnel at the time of the fire is very high, which requires rapid and appropriate action of control systems in terms of significantly reducing the risk by mobilizing the so-called fire scenario.

Setting up a uniform and generally valid model is practically impossible, so engineers use various numerical simulations which using numerical methods allow making acceptable approximations for practice, thus ensuring the prescribed safety requirements for fire management in different tunnel environments at variable energy levels the strength of fires resulting from intense burning indoors.

In order to avoid the catastrophic consequences of fires in road tunnels as much as possible, it is necessary to ensure adequate and appropriate ventilation conditions by taking into account various influencing factors, first in computational models and then in design solutions and their implementations, external winds, intensity and types of traffic flows in the tunnel, switching on and operation of fans with all associated ventilation facilities, etc. The aim is to provide such ventilation conditions or stratification of tunnel air to prevent the dangerous mixing of fresh air and smoke during the evacuation of people from the tunnel or the evacuation to specially designed spaces. Therefore, there is an essential requirement in the profession that, if possible, two-pipe tunnels be built, wherein in case of emergencies, evacuation to an adjacent tunnel tube through crossbars built at prescribed longitudinal distances is possible.

The aim of the research was to ensure that hot flue gases under the ceiling are kept as long as possible through appropriate calculation models and comparisons with classical calculation methods that simulate different fire scenarios and technical solutions for

ventilation in road tunnels, which realistically allows most participants safe withdrawal from a tunnel or an adjacent tunnel tube.

Key words: road tunnel, longitudinal ventilation, gusts of wind, bora, CFD simulations, Kennedy's equation, Stratification, Emissions, Backlayering, Congestion

ŠIRŠI POVZETEK VSEBINE

Poleg emisij, ki nastajajo v cestnem predoru, v katerem poteka promet v normalnih razmerah. V primeru požara v predoru nastaja še emisija, povečana količina strupenih in zdravju škodljivih plinov in dima. Potrebne količine svežega zraka ne določamo samo za eno samo hitrost vožnje, temveč jo moramo določiti za celotno hitrostno območje, med 0 km/h in maksimalno dopustno hitrostjo, ki v največ primerih znaša 100 km/h. V izračunih posameznih parametrov: temperature zraka, koncentracije dima (vidljivosti), strupenih plinov (CO, NO_x), hitrosti zraka in s tem pojav povratnega toka (*backlayering*), spremembe tlaka in moči požara, je treba upoštevati prispevek vsakega voznega pasu v predorski cevi oz. ker je večina predorskih cevi dvopasovna, se upoštevata dva pasova. Poleg poznavanja prometnih razmer v predoru, je pomembna gostota in vrsta vozil v predoru, ki prav tako vpliva tudi na hitrost prometa in s tem tudi na hitrost zraka v predorski cevi. To je pomembno predvsem v predorih, ki so bili zgrajeni za potrebe hitrejših dostopov do določenih območij. Izpolnjena mora biti zahteva, da je v primeru požara v predorski cevi, omogočena vsem udeležencem v prometu evakuacija ter varen dostop gasilcem in reševalnih ekip do ogroženega območja.

Veter je za padavinami, ki lahko povzročajo poplave, ena od vremenskih spremenljivk, ki naredijo največ škode in težav pri načrtovanju in izvedbi prezračevalnih sistemov v cestnih predorih. To je izpostavljeno pri načrtovanju in izvedbi prezračevanja v primerih izrednih dogodkov, med katere se prišteva požare različnih moči od nekaj deset MW do več sto MW. Spremljanje intenzivnosti vetrovnih razmer je v državah urejeno z regulativo, ki vključuje delovanje strokovnih organov državne uprave za navedeno področje. V Republiki Sloveniji je to področje podrejeno Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO), ki redno spremlja, analizira in primerja novejša rezultate s preteklimi.

Kot primer navajamo avtocestne predore Kastelec, Dekani in Markovec, ki so zgrajeni na območju s povečanimi jakostmi vetrov, predvsem burjo. To je močan in zelo sunkovit veter, za katerega je značilno hitro in nenadno spreminjanje jakosti in smeri, kar realno otežuje normalno prezračevanje navedenih predorov. Predvsem je izpostavljen predor Kastelec, ki smo ga posebej in natančno analizirali, kjer je lahko na portalnih območjih učinek burje tako velik, da je zagotavljanje gibanja zraka v predorskih ceveh v smeri odvijanja prometa, zelo otežkočeno. To zahteva od upravljavca predora, da v izjemnih primerih predor zapre, dokler niso vzpostavljene varne razmere.

Poglobljena analiza požarov v cestnih predorih je pokazala, da je treba v njih upoštevati naslednje specifične razmere:

- prostor je zgoraj omejen, dim in toplota se širita vodoravno
- v prostoru so vedno ljudje, lahko tudi otroci in invalidi
- v prostoru je močno zmanjšana vidljivost
- v prostoru je običajno veliko potencialnih virov za širjenje požara
- otežen je umik
- možen je nastanek panike
- potrebno je preiščeno prezračevanje
- treba je izdelati različne scenarije in protokole načina prezračevanja v izrednih razmerah
- posebno pozornost je treba posvetiti morebitni spremembi enosmernega prometa v dvosmerni, saj je tej ureditvi prezračevanje bistveno bolj občutljivo na možne spremembe gibanja zraka v predoru.

Preverjanje možnega nastanka povratnega gibanja zraka v predorski cevi v primeru požara je pomembno, saj je tovrstno gibanje, ki je v praksi bolj poredko, zelo nevarno za izvedbo celovite evakuacije ljudi iz predorske cevi. Tovrstno preverjanje je možno z upoštevanjem karakterističnih parametrov v odvisnosti od razmer in dejavnikov v in izven predorske cevi. V tovrstnih analizah je pomembna razdelitev zračnega toka v prečnem prerezu predorske cevi ali na kratko od stratifikacije zraka.

Analize rezultatov obsežnih numeričnih simulacij gibanja zraka v predorski cevi za različne prametre, ki so zajemali vnaprej predpisane hitrosti vhodnega vetra, različno število vključenih ventilatorjev (0, 12 ali 14), različne hitrosti in potiske ventilatorjev, različne moči požara (30, 40, 100 in 300 MW), različne dolžine požarov (5 ali 10 metrov), različne lokacije požarov (600 ali 1000 metrov), so rezultat poglobljenega raziskovalnega dela. Uporabili smo računalniški program IDA RTV (2017), ki omogoča izvedbo kakovostnih parametričnih analiz z uporabo simulacij časovno odvisnih dogajanj pri prezračevanju predorskih cevi.

Ugotovili smo, da je kljub variiranju razmer, v večini primerov kritična hitrost zraka v_{krit} skoraj enaka, in se giblje okoli srednje vrednosti 2,2 m/s, kar je nad kritično vrednostjo hitrosti zraka 1,5 m/s. **Ta povprečna vrednost hitrosti zraka še preprečuje povratno gibanje dima, oz. s tem nastalo recirkulacijo.**

Nadalje je bilo ugotovljeno, da v dveh primerih vrednost kritične hitrosti zraka vseeno pade pod mejno vrednost, pri tlaku 250 Pa in 300 Pa. Pri teh dveh vrednostih se predznaki pri količini vpihanega zraka v predorski cevi spremenijo. To pomeni, da povišana hitrost burje preusmeri tok zraka v predorski cevi, kar je nedopustno. Prehod v območje povečane ogroženosti v

predorski cevi iz varnega v nevarno območje ni dovoljeno. Ta ugotovitev je še posebej pomembna za oceno stanja prezračevanja v času reševanja v primeru požara v predorski cevi.

Glede na zahtevnost evakuacije in reševanja v cestnih predorih v primerih izrednih dogodkov, morajo biti požarni scenariji in protokoli delovanja prezračevalnega sistema izdelani tako, da so upoštevane vse vplivne veličine in faktorji, ki smo jih analizirali v naših poglobljenih analizah.

Pokazali smo tudi, da je za celovite analize prezračevanja v cestnih predorih treba uporabljati ustrezne numerične metode, ki omogočajo hitre in učinkovite analize veličin ob upoštevanju nelinearnih odnosov med ključnimi parametri gibanja zraka v predorskih ceveh.

IZJAVA

Podpisani, mag. Ivan Kenda, univ. dipl. inž. teh. prom., inž. str., izjavljam, da je doktorska disertacija z naslovom **Emisije v predoru in njihov vpliv na okolje** rezultat mojega raziskovalnega dela.

Podpis doktoranda

VSEBINSKO KAZALO

1. UVOD	1
2. OBRAZLOŽITEV DOKTORSKE TEZE	2
2.1 HIPOTEZA	2
2.2 PRIČAKOVANI REZULTATI	2
3. DOSEDANJE RAZISKAVE	4
3.1 POMEMBNEJŠI VPLIVNI DEJAVNIKI TVEGANJA PRI DOLOČANJU PREZRAČEVALNIH PARAMETROV CESTNIH PREDOROV	4
3.2 VPLIV GOSTOTE PROMETA	4
3.3 VPLIV VETRA	7
3.3.2 SMER VETRA	7
3.4 VPLIV VZDOLŽNEGA NAKLONA	10
3.5 VPLIV POŽARA	11
3.5.1 EVAKUACIJA POTNIKOV	13
3.6 VARNOSTNE NAPRAVE V PREDORU	14
3.7 OBNAŠANJE OSEB OB IZREDNEM DOGODKU V PREDORU	17
3.8 VZDOLŽNO PREZRAČEVANJE	19
3.9 KRITIČNA (MEJNA) HITROST ZRAKA V PREDORSKI CEVI	19
3.9.1 ODVISNOST KRITIČNE HITROSTI ZRAKA OD TLAKA VETRA SPREMENLJIVIH SMERI	20
3.9.2 ENAČBE ZA DOLOČANJE KRITIČNE HITROSTI ZRAKA	22
3.9.3 IZRAČUN KRITIČNE HITROSTI ZRAKA	24
3.9.4 KENNEDYJEVA ENAČBA	26
4. METODE RAZISKOVANJA	30
4.1 MATEMATIČNI MODEL PREDORA	31
4.2 SHEMA MODELA	33
4.3 NORMALNO PREZRAČEVANJE	33
4.4 POŽARNO PREZRAČEVANJE	33
4.4.1 IZBIRA CFD PROGRAMA ZA SIMULACIJE	35
5. PROMETNE IN PREZRAČEVALNE RAZMERE OKROG PREDORA KASTELEC IN V NJEGOVI NOTRANJOSTI	37
5.1 BURJA IN PREDOR KASTELEC	37
6. ANALIZA DOBLJENIH REZULTATOV	45
6.1 NAPAKE PRI IZRAČUNIH PO ENAČBAH	45
6.2 ANALIZE IN SIMULACIJE S PROGRAMOM IDA RTV (2017)	47
6.2.1 SCENARIJI	48
6.2.1.1 ANALIZA RAZMER OB NORMALNI VOŽNJI BREZ POŽARA	48
6.2.2.2 PRIMERJAVA SIMULACIJ POŽAROV V VZHODNI PREDORSKI CEVI	71
7. POVZETEK IN UGOTOVITVE	91
8. ZAKONODAJA IN PREDPISI	97
8.1 SEZNAM UPORABLJENE ZAKONODAJE IN PREDPISOV	99
9. VIRI	102

SEZNAM SLIK

Slika 1: Osnovni princip vetrne rože (Vir: ARSO)	7
Slika 2: Vpliv vetra pri pozitivnem naklonu vozišča (Vir: DARS, 2017).....	10
Slika 3: predori na avtocestni mreži v Sloveniji (vir: DARS, 2014).....	11
Slika 4: Naraščanje temperature in razvoj dima pri požaru v predoru, (Vir: splet, 2014)	12
Slika 5: Dim iz predora Trojane, (Vir: DARS, 2013)	12
Slika 6: Oprema ter varnostni sistemi in naprave v predoru (vir: DARS, 2005)	14
Slika 7: Videonadzorni sistem v predoru (vir: DARS, 2014)	15
Slika 8: Gasilni aparati v posebnih nišah v predoru (vir: DARS, 2011)	16
Slika 9: Informacijska tabla pred predorom Kastelec (vir DARS, 2005).....	16
Slika 10: prečni prehod v dvocevnem predoru (vir: DARS, 2015).....	18
Slika 11: Nezadostno prezračevanje v predoru, ker požar povzroča povratni tok zraka, (Vir: Petelin, 2005)	21
Slika 12: Zadostno prezračevanje v predoru, požar ne more povzročiti povratnega toka zraka, (Vir: Petelin, 2005)	21
Slika 13: Širjenje dima in toplote s toplotnim sevanjem pri različnih hitrostih zraka v predoru, (Vir: Modic, 2021).....	21
Slika 14: Osnovni prikaz programa in začetna osnovna shema predora (Vir: IDA RTV, 2020).	34
Slika 15: Hitrost vetra, september - marec 2010, Kastelec, vzhodna cev, izhod, (Vir: ARSO, 2010)..	37
Slika 16: Sunki vetra, september - marec 2010, Kastelec, vzhodna cev, izhod, (Vir: ARSO, 2010)....	37
Slika 17: Izhodni portal predora Kastelec, leva cev (Vir: DARS, 2004)	39
Slika 18: Shema obratovanja ventilatorjev v smeri proti Ljubljani v primeru burje, (Vir: Petelin s sod., 2005)	40
Slika 19: Emisije dimnih plinov iz predora Markovec in njihov vpliv na naselja, (Vir: Načrt ZIR, 2015)	42
Slika 20: Vz dolžno prezračevanje v predoru, (Vir: Suban in sod., 2016).....	42
Slika 21: Shema obratovanja ventilatorjev v smeri Koper - Ljubljana, (Vir: raziskovalna naloga MO RS, 2005).....	43
Slika 22: Burja zaprla predor Kastelec, (Vir; foto arhiv DARS, 27.11.2015).....	44
Slika 23: Skica tlorisa predora Kastelec z bistvenimi podatki o prečnikih in ventilatorjih, (Vir: Modic, 2021)	47
Slika 24: Izračun s pomočjo programa IDA RTV – vnos parametrov (burja)	76
Slika 25: Izračun s pomočjo programa IDA RTV – preglednica emisij za CO (burja1)	77
Slika 26: Izračun s pomočjo programa IDA RTV - vhodni portal (burja1)	80
Slika 27: Določitev mejnih vrednosti s pomočjo programa IDA RTV (burja1)	81
Slika 28: Zaustavitev prometa v vzhodni predorski cevi predora Kastelec zaradi burjev časa 5.1. do 5.3.2022.....	90

SEZNAM PREGLEDNIC

Preglednica 1: Odvisnost med tlakom in hitrostjo burje in hitrostmi v predora	20
Preglednica 2: Vhodni podatki pri izračunih moči požarov v enačbah 23 do 30	26
Preglednica 3: primerjava CFD programov pred izvedbo simulacij v aprilu 2020	36
Preglednica 4: Napake med rezultati izračunov pri moči požara 30 MW	45
Preglednica 5: Napake med rezultati izračunov pri moči požara 40 MW	45
Preglednica 6: Napake med rezultati izračunov pri moči požara 100 MW	45
Preglednica 7: Napake med rezultati izračunov pri moči požara 300 MW	45
Preglednica 8: Analiza razmer v vzhodni predorski cevi pri različnih tlakih vetra - burje, brez požara	49
Preglednica 9: Prikaz količin v vzhodni predorski cevi pri tekočem prometu, brez požara	49
Preglednica 10: Analiza prezračevalnih razmer v predoru v primeru enake moči in lokacije požara ter različnih tlakov vetra	63
Preglednica 11: Prikaz parametrov zraka v predorski cevi v primeru različnih moči požarov in hitrosti vetra (congestion)	64
Preglednica 12: Primerjava simulacij požarov v predoru	72
Preglednica 13: Izračunane mejne vrednosti za CO, NO ₂ , in dima	73

SEZNAM OKRAJŠAV IN POSEBNIH SIMBOLOV

R	plinska konstanta
A	čisti prerez toka fluida
c_p	specifična toplota zraka
Q	skupna toplota pri zgorevanju, $Q = Q_k + Q_s$
Q_k	konvekcijska toplota
Q_s	sevalna toplota
F_r	Freudovo število pri zračnem toku ob požaru
F_{rc}	kritično Freudovo število
g	zemeljski pospešek
H	karakteristična dolžina sile vzgona; razdalja od točke požara do najvišje točke pod stropom
K_1	$F_r^{-0.33}$
K_g	stopenjski faktor, korekcija naklona
m	masni pretok zraka do mesta požara
p	absolutni zračni tlak
R	plinska konstanta
T	temperature vstopajočega zraka
T_d	povprečna temperatura dimnih plinov
u	hitrost vstopajočega zraka
u_c, v_{crit}	kritična hitrost zraka
w	širina predora
ϱ	povprečna gostota vstopajočega zraka
ϱ_d	povprečna gostota dimnih plinov
D	gostota prometa pri srednji hitrosti
D_0	gostota prometa v prostem teku
D_t	gostota tovornih vozil
M	število vozil
M_{max}	maksimalno število vozil
v	srednja hitrost vozil
v_{opt}	optimalna hitrost vozil
v_{dop}	dopustna hitrost vozil
G_s	faktor istočasnosti
p_t	delež tovornih vozil
σ	standardna deviacija
Δp	razlika tlakov
P_{zr}	gostota zraka
PIARC	World Road Association – svetovno cestno združenje
DARS	družba za avtoceste Republike Slovenije
CO	ogljikov monoksid
NO _x	dušikovi oksidi
k	količnik dušenja svetlobe
PLC	programabilen logični krmilnik
t	določena časovni interval
R_{ic}	Danziger & Kennedy, Richardsonovo število
T_f	Thomas-Froude
F_{rm}	Froude (po Kennedyju), Freudovo kritično število
Ken	Kennedy

T_0	izmerjena temperatura
grade	naklon
L	dolžina predora
P	tlak, povzročen z batnim efektom
ϱ	gostota zraka
c_{tk}	torni koeficient vozila
A_p	prerez predora
A_v	čelna površina vozila
v_v	hitrost vozila
u_z	hitrost zraka
n	število ventilatorjev
V_{vent}	hitrost ventilatorja
$Q_{levo, desno}$	zračni tok
t	čas
3D	tridimenzionalna oblika
RVS	avstrijski predpisi
CFD	(Computational Fluid Dynamics) - računalniška dinamika tekočin
RANS	(Reynolds Averaged Navier–Stokes) - metoda Navier-Stokesovih enačb
LES	(Large Eddy Simulation) - simulacija velikih vrtincev
DNS	(Domain Name System) - neposredna numerična simulacija
SES	(Subway Environment Simulator) – simulator v podzemnem okolju
IDA RTV	programska oprema za raziskovanje prezračevanja predorov
NIST-FDS	programska oprema za analizo pretoka tekočine in prenosa toplote
HRR	stopnja sproščene toplote
ARSO	Agencija Republike Slovenije z okolje
FDS	(Fire Dynamics Simulator) - enačbe za numerično reševanje povratnega toka
ANSYS- Fluent	programska oprema za raziskovanje prezračevanja predorov

1. UVOD

Predor je del ceste. Na širšem vplivnem območju je potrebno promet voditi tako, da bi se izognili zastojem, s tem pa tudi nastanku koncentracij emisij v predoru. Skladno z zakonodajo je potrebno določiti vplivno območje, s prometnimi študijami in presojami vplivov na okolje, v izrednih primerih pa tudi spremeniti režim prometa in signalizacije, da ne bi prišlo do neželenih situacij v predoru.

Če v predoru izbruhne požar in se pri tem pojavi pomanjkanje svežega zraka, nastajajo velike količine dima, ki onemogočajo vidljivost in možnost gibanja z vozili. Nastaja močan tok dimnih plinov, ki se pomika v vseh smereh. Če je hitrost zračnega toka nizka, se dim dalj časa zadrži pod stropom v obliki plasti, s tem pa omogoča umik udeležencev v prometu po vnaprej določenih poteh.

Stroka tudi v primeru povratnega gibanja zraka ni enotna. Nekateri strokovnjaki menijo, da je treba prezračevanje predora uporabiti takoj, kar po navadi povzroči hitro spuščanje dima in zelo kratek čas za umik ljudi, na drugi strani pa zopet drugi trdijo, da to lahko naredimo le, če v predoru ni več ljudi, oz. da se dim spusti proti tlom brez prezračevanja bolj počasi.

V cestnem predoru ob normalni vožnji nastajajo emisije. V primeru požara v predoru nastaja še emisija dima. Potrebno količino svežega zraka ne določamo samo za eno samo hitrost vožnje, temveč jo moramo določiti za celotno hitrostno območje, med 0 km/h in med maksimalno dopustno hitrostjo 5,4 km/h. Računati moramo posebej za vsak vozni pas v cevi predora (cevi so večinoma dvopasovne). Poznati moramo prometne razmere. Količina prometa vpliva tudi na hitrost vožnje. Predori predstavljajo bližnjico v prometu.

2. OBRAZLOŽITEV DOKTORSKE TEZE

2.1 HIPOTEZA

Poleg emisij, ki nastajajo v cestnih predorih ob normalni vožnji, v primeru požara v predoru nastaja še emisija dima in bistveno povečanje koncentracij strupenih in drugih škodljivih plinov. Načrtno zmanjševanje koncentracij polutantov, ki nastanejo v predoru, je zelo pomembno za trajnostno vzdrževanje kakovostnih okoljskih razmer v prihodnosti. Bistven prispevek k temu cilju bodo imela vozila na električni pogon. Še vedno pa ostane vprašanje, kako obvladovati požare različnih moči, da se nedvoumno zagotovi varen umik ljudi iz predora. Smer toka emisij in dima je v dvosmernih predorih težje predvidljiva, kot v predorih z enosmernim prometom, kjer je smer toka zaradi batnega učinka načelno vedno v smeri prometa. V primeru požara v predoru nastaja povratno gibanje zraka, ki je nezaželeno, odvisno pa je od razmer in dejavnikov v in izven predora. Pomembna je tudi razdelitev zračnega toka po višini svetlega profila predora (stratifikacija). Emisija in dim, stratifikacije in visoke temperature, ob izpostavljenosti (npr. pri požaru) ogrožajo ljudi in okolje (npr. površinska in talna voda).

Da se požar in dim v predorski cevi ne bi razširila v nasprotni smeri vožnje, morajo ventilatorji delovati in doseči hitrost vsaj 1,5 m/s po prerezu predora zaradi stratifikacije dima. Trdimo, da so ventilatorji potrebni za vzdrževanje ustreznih vozniških razmer in varnosti v predoru tudi v primeru izrednih dogodkov. Zato je treba zagotoviti razmere, ki sočasno vzdržujejo razslojevanje plasti dima in svežega zraka. Najbolj pomembnih je prvih 8 minut po nastanku požara. Po umiku ljudi iz predora, poženemo ventilatorje, hitrost zraka se poveča na 3,60 m/s, kar zadošča za uspešno odstranjevanje dima in vročih plinov.

Iz navedenega izhaja, da je cestni predor glede na varnost in hitrost v prometu ter koncentracije polutantov, ki nastanejo ob normalnem prometu, boljše alternativa gradnji novi ali že obstoječi cesti v mestu (Predor Šentvid, Predor pod Ljubljanskim gradom). Z razvojem in vedno nižjimi koncentracijami motorjev z notranjim zgorevanjem, bo v prihodnje treba v predor vgraditi precej manj elektro strojne opreme, kar pomeni tudi precejšnje znižanje investicijskih in obratovalnih stroškov, čeprav v primeru požara še vedno potrebujemo učinkovit sistem gašenja in prezračevanja.

2.2 PRIČAKOVANI REZULTATI

Glavni prispevek doktorske disertacije k razvoju znanosti je dokazati, da je zaradi ogrožanja zdravja in življenja ljudi najbolj pomembno doseči zmanjševanje koncentracij polutantov v celotnem območju predora. Za dokazovanje bodo uporabljene meritve in analize koncentracij

emisij v in izven predorov. Rezultati in zaključki bodo koristili pri določanju mejnih vrednosti vpliva emisij iz predora na okolico.

Pomembno je spoznanje, da za analizo stanja v predoru osnovna teorija ni dovolj, potrebno je izvesti tudi računalniško simulacijo resničnih primerov. Simulacije, ki so bile izvedene s programom IDA RTV (2017), so zajele naslednje parametre: temperaturo zraka, koncentracijo dima (vidljivost), strupene pline (CO, NO_x), hitrosti zraka in s tem pojav vzratnega toka, spremembe tlaka zraka.

Uspešen nadzor pri širjenju dimnih plinov v izrednih dogodkih, je ena izmed najpomembnejših nalog pri načrtovanju prezračevanja predorov. Prezračevalni sistem, nameščen v predoru, mora zagotavljati varno okolje tako v normalnih kot tudi v izrednih razmerah. Podrobno razumevanje značilnosti in zakonitosti širjenja dimnih plinov v predorih je osnova in potreba za uspešno načrtovanje prezračevalnih sistemov.

Pojavi do mejne (kritične) hitrosti zraka v predoru (0 do 1,5 m/s) so še vedno precej neraziskani. Pojavi se povratni tok. Zato je zaradi nepoznavanja razmer upoštevanje stratifikacije vprašljivo in tudi nezaželeno. Velika verjetnost je, da je turbulenca zraka tista, ki povzroča povratno gibanje. Do odstopkov prihaja zaradi mešanja dima z zrakom. Dim se ohlaja, to pa pomeni razvoj različne hitrosti dima in hitrejše spuščanje k tlom.

Ko zaradi kontroliranega prezračevanja zunanji zrak ne more vplivati na hitro ohlajanje nastalih dimnih plinov, oz. mu to onemogočimo (stratifikacija se ohranja), pride do delnega povratnega toka dimnih plinov. S tem lahko zagotovimo 8 do 10 minut časa za evakuacijo večini udeležencev brez posledic. Dimni plini se namreč v tem času zadržujejo pod stropom.

Točno določeni pogoji pomenijo poznavanje delovanja ventilatorjev, oz. prezračevanja predora v vseh vremenskih razmerah (brezvetrje, sunkovit veter, burja, ipd.), z ustreznim načinom delovanja ventilatorjev lahko zunanji vpliv vetra na požar v predoru preprečimo, oz. zagotovimo razmere, ki onemogočijo takojšnje mešanje hladnega zunanjega zraka z vročimi dimnimi plini. To pomeni, da čim dlje ohranimo stratifikacijo, vseskozi pa nadzorujemo povratni tok. Zato so potrebne še nadaljnje raziskave in simulacije, tudi požarni poskusi v samih predorih.

Zaradi požara in nastalega dima lahko pride tudi do panike (npr. izstop 50 potnikov iz avtobusa). V dvocevnih predorih so na voljo prečne povezave z vzporednim predorom na vsakih 350 do 400 metrov, kar dosežemo pri normalni hoji v petih minutah, pri teku pa v nekaj minutah.

Cilj naloge je, da s pomočjo analiz in simulacij prikažemo razlike za posamezne scenarije ukrepanja.

3. DOSEDANJE RAZISKAVE

Namen analiziranja požarne varnosti v cestnih predorih je povečati raven varnosti uporabnikov. Modelne preiskave so po navadi izvedene s pomanjšanimi modeli pravih predorov, glavni namen pa je preučevanje učinkovanja protipožarnega nadzora dima z vzdolžnimi in vzdolžno-naravnimi prezračevalnimi sistemi. Največkrat je bila preučevana učinkovitost prezračevalnih sistemov na porazdelitev temperature in razslojevanje dima.

3.1 POMEMBNEJŠI VPLIVNI DEJAVNIKI TVEGANJA PRI DOLOČANJU PREZRAČEVALNIH PARAMETROV CESTNIH PREDOROV

Umeščanje cestnih predorov v prostor, priprave na gradnjo, gradnja, obratovanje in vzdrževanje je strokovno in vsestransko pomemben proces, ki zahteva sodelovanje mnogih strok, medsebojno usklajevanje ter spoštovanje sprejetih strokovnih odločitev. Mednje spada tudi prezračevanje v času gradnje in kasneje obratovanja, saj je zagotavljanje varnosti potnikov v prometu pomemben del celotnega delovanja sistema, v našem primeru povezav na vseh ravneh cestnega prometa. Da bi se lažje odločali o tehnoloških rešitvah prezračevalnih sistemov v cestnih predorih, ima vsaka država svoje zakone in druge akte, ki spadajo v obsežno regulativo, ki pokriva to kompleksno področje. Temu primerno v nadaljevanju podajamo bistvene faktorje, ki vplivajo na tehnične rešitve prezračevanja z namenom, da se pri načrtovanju lažje približamo strokovnim rešitvam, ki morajo ustrezati že navedenim regulativnim zahtevam.

3.2 VPLIV GOSTOTE PROMETA

Število vozil in njihovo gostoto izražamo z vrednostjo D (zaradi kompatibilnosti z metodologijo EU). V odvisnosti od hitrosti se spreminja tudi razdalja med posameznimi vozili, ta je odvisna še od razmerja med osebnimi in med tovornimi vozili.

Na osnovi statističnih podatkov za evropske države uvedemo faktor istočasnosti G_s , ki je za različne države različen. Za Avstrijo npr. velja:

- avtocestni promet $G_s = 2.60$
- mestni tekoči promet $G_s = 2.30$
- mestni promet $G_s = 2.00$

V prvi aproksimaciji prevzamemo avstrijske podatke. Povezavo med gostoto prometa D in med številom vozil pri konstantni srednji hitrosti v (km/h) izrazimo z enačbo:

$$M = D \cdot v \quad (1)$$

Kjer pomeni:

D	gostota prometa pri srednji hitrosti vozil	[1/km]
v	srednja hitrost vozil	[km/h]
M	število vozil	[1/h]

Z upoštevanjem pričakovanih fizikalnih (zavorna razdalja, čas ustavljanja) in psiholoških (reakcijski čas, zaznavanje spremembe situacije) pogojev dobimo za pot ustavljanja in reakcijski čas v hitrostnem območju $0 < v \leq v_{opt}$.

Za povezavo med gostoto prometa (ali *količino prometa*) in hitrostjo vožnje velja razmerje

$$D = \frac{D_0 M_{\max}}{D_0 v + M_{\max} \left(1 - \frac{v}{v_{opt}}\right)^2} \quad (2)$$

in

$$D = \frac{D_0 M_{\max} v}{D_0 v + M_{\max} \left(1 - \frac{v}{v_{opt}}\right)^2} \quad (3)$$

Po podatkih o številu prometa, na nekaterih avtocestah računamo na en vozni pas, (podobni so tudi podatki iz Avstrije), da je $D_0 = 150$ 1/km. Ta vrednost je v primerjavi s podatki iz literature razmeroma nizka. Razlog je v tem, da so v predoru vozniki previdnejši (velja za dobre voznike) in pustijo med avtomobili večjo razdaljo. Na osnovi istih meritev upoštevamo, da je $M = 1000$ 1/h, vendar so to orientacijske vrednosti. V enačbi ostaja vrednost M , ki jo lahko poljubno spreminjamo.

Maksimalno število vozil na poti skozi predor je, gledano v celoti kot eno samo telo, je doseženo pri srednji hitrosti vozil približno $v = v_{opt} = 60$ km/h.

Če je hitrost vozil večja od optimalne hitrosti, torej če je $v > v_{opt}$, se gostota prometa in število avtomobilov pričneta manjšati. Raziskave kažejo, da je v območju $60 \text{ km/h} < v < v_{dop}$ približno linearna odvisnost med številom vozil oz. gostoto prometa in hitrostjo. Tako je:

$$D = \frac{M_{\max}}{v} \left(\frac{v_{dop} - v}{v_{dop} - v_{opt}} \right) \quad (4)$$

in

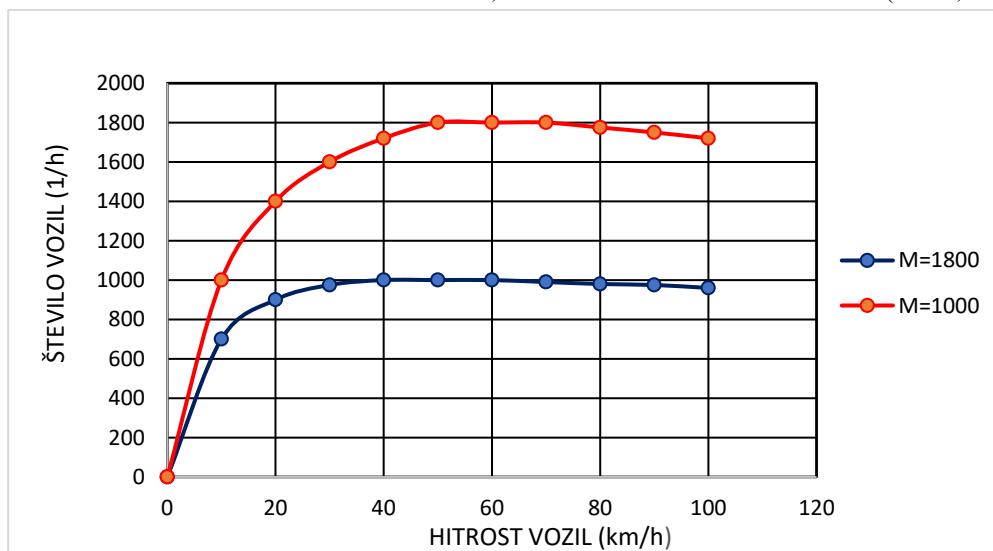
$$M = M_{\max} \left(\frac{v_{dop} - v}{v_{dop} - v_{opt}} \right) \quad (5)$$

V enačbah (2) do (5) pomeni:

D	gostota prometa pri srednji hitrosti vozil	[1/km]
D_0	gostota prometa v prostem teku	[1/km]
M	število vozil	[1/h]
$M_{\max}$	maksimalno število vozil	[1/h]
V	srednja hitrost vozil	[km/h]
v_{opt}	optimalna hitrost vozil	[km/h]
v_{dop}	dopustna hitrost vozil	[km/h]

Funkcijo $M = M(v)$ za, npr. $M_{\max} = 1800$ 1/h, oziroma $M_{\max} = 1000$ 1/h, in za celotno območje hitrosti $0 < v < v_{\text{dop}}$, lahko zaradi večje preglednosti prikažemo tudi grafično (Graf 1).

Graf 1: Odvisnost števila vozil M od hitrosti vozil v , za $M_{\max} = 1800$ 1/h in $M_{\max} = 1000$ 1/h (Modic, 2021)



Kot v svojem delu pravi Modic (2021), pri izbrani optimalni hitrost vozil $v = 60$ km/h vidimo, da se s povečanjem hitrosti propustnost predora ne poveča, ampak se celo zmanjša. Pri hitrostih pod 30 km/h propustnost drastično upada, zlasti pri večji gostoti prometa. Če povečamo optimalno hitrost na 80 km/h, dobimo skoraj identično sliko.

Če je delež tovornih vozil p_t (%), glede na skupno število vozil v predoru, lahko izrazimo gostoto osebnih vozil pri polni obremenitvi (indeks o) z enačbo

$$D_0 = \frac{\frac{100}{p_t} - 1}{\frac{100}{p_t} - 1 + G_s} \quad (6)$$

in gostoto tovornih vozil (indeks t) pri polni obremenitvi

$$D_t = D \frac{1}{\frac{100}{p_t} - 1 + G_s} \quad (7)$$

Kjer v enačbah 6 in 7 pomeni:

D_t	gostota tovornih vozil pri polni obremenitvi	[1/km]
D_0	gostota osebnih vozil pri polni obremenitvi	[1/km]
p_t	delež tovornih vozil	[%]
G_s	faktor istočasnosti	[-]

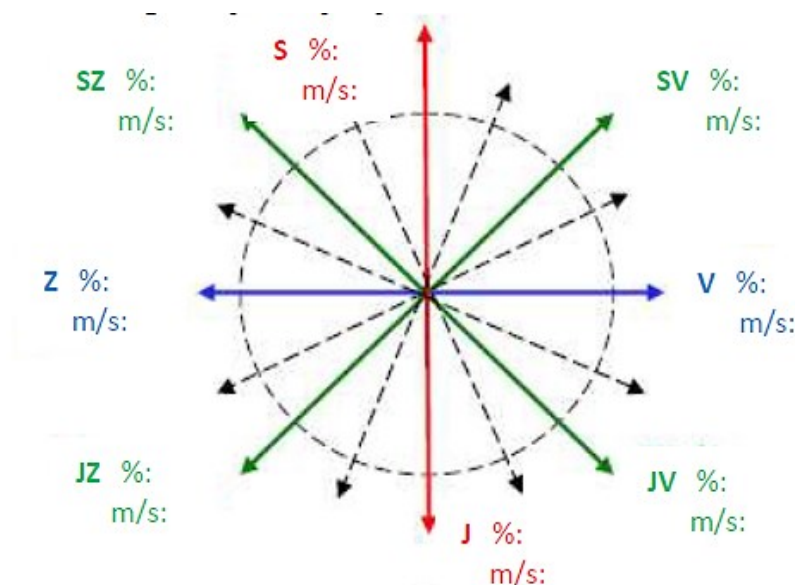
3.3 VPLIV VETRA

3.3.1 SPLOŠNO

Veter je ena izmed tistih vremenskih spremenljivk, ki povzročajo največ škode in težav pri prezračevanju, še posebej pa v primeru požarov v cestnih predorih. Zato je potrebno vetrovne razmere redno spremljati in primerjati s preteklimi. V Sloveniji to izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO). Za vetrovne razmere povprečnega leta smo analizirali podatke nekaterih samodejnih meteoroloških merilnih postaj. Te so po Sloveniji razporejene relativno enakomerno.

3.3.2 SMER VETRA

Smeri vetrov je raziskoval ARSO. To običajno grafično prikažemo z vetrnimi rožami. To so večkotniki, katerih diagonale prikazujejo, kako pogosto piha veter z izbrane smeri. Vetrne rože za izbrane merilne postaje so za referenčno obdobje in za leto 2006. Rože so postavljene v točke - postaje, na katerih so od julija do decembra merili hitrosti.



Slika 1: Osnovni princip vetrne rože (Vir: ARSO, 2016)

Primer vetrne rože je prikazan na Sliki 1. Primer na sliki je splošna osnova, oziroma model. Vnesti moramo ustrezne podatke, bazo podatkov ima ARSO.

Skladno s priporočili (PIARC - "Fire and Smoke Control in Road Tunnels", 05.05.B, 1999, str. 167) upoštevamo $\cos f = 50^\circ$ (kot med smerjo burje in osjo predora na osnovi podatkov iz meteorološke postaje na viaduktu Smelavc), kar pomeni, da lahko upoštevamo, da je kritična hitrost burje 75 km/h. Hitrost gibanja zraka v tem primeru je, z upoštevanjem vzgona, 1.36 m/s, kar ustreza tudi PIARC priporočilom.

Hitrost gibanja zraka v predoru je odvisna od cele vrste faktorjev. Ti faktorji so:

- maksimalna hitrost vetra
- kot, pod katerim piha veter v predor
- povprečna hitrost vetra
- temperatura zraka v predoru
- gostota zraka (odvisna od temperature)
- vzgon v predoru (odvisen od temperature)
- trenje v predoru (odvisno od temperature).

V nadaljevanju povzemamo nekatere splošne ugotovitve (Suban, 2015). Namen več dosedanjih raziskav, je bil opredeliti vpliv vetra s svojimi karakteristikami na vzdolžno prezračevanje v cestnih predorih. V sklopu raziskovanja sem se osredotočil na različne vetrovne lastnosti, saj vsi vetrovi niso enaki. Dosedanje raziskave, opredeljene v literaturi, so bile usmerjene predvsem na raziskovanje vpliva konstantnega vetra na prezračevanje predora. Ena od ključnih značilnosti določenih vetrov (npr. burja) pa je sunkovitost.

Sunkovitost vetra je lastnost, zaradi katere veter ne piha konstantno z enako hitrostjo, ampak se njegova hitrost bistveno spreminja v času tudi za 3 ali 4 kratnik povprečne hitrosti. Vpliv nestacionarnosti vetra na prezračevanje v predoru do sedaj ni bil podrobneje raziskan. Tako so opredeljene ključne karakteristike sunkovitega vetra, ki vplivajo na prezračevanje cestnega predora. Izpostavljena je periodičnost med sunki vetra, jakost sunka in njegovo trajanje.

Za glavno metodo raziskovanja so uporabljene CFD-simulacije s programom NIST-FDS. V raziskavah je za program FDS predstavljena sestava CFD-modela, ki vključuje opis vnosa sunka vetra v robne pogoje modela. Program omogoča vnašanje tlačnih robnih pogojev, ki se spreminjajo v času, zato je primeren za raziskovanje vpliva nestacionarnega vetra. Geometrija v simulaciji je bila povzeta z upoštevanjem parametrov cestnega predora Kastelec.

Na podlagi številnih simulacij v sklopu raziskovanja je predstavljenih 6 ključnih scenarijev, ki upoštevajo prej našteje lastnosti sunkovitih vetrov in primerjavo dveh različnih jakosti požara v predoru, 10 in 15 MW.

Rezultati scenarijev potrjujejo različen vpliv konstantnega in nestacionarnega vetra na prezračevanje v cestnem predoru. Zaradi kratkotrajnosti najvišje hitrosti vetra v času sunka je odvod dima iz predora lahko še vedno ustrezen, saj inercija hitrosti zraka v predoru premaguje vpliv vetra na portalu. Prav tako se je izkazalo, da je jakost požara pomemben dejavnik ustreznosti prezračevanja ob vetrovnih vplivih. Validacija teoretičnih CFD-scenarijev je bila izvedena z realnimi meritvami. Družba za avtoceste Republike Slovenije Dars d.d. izvaja na območju predora Kastelec meritve hitrosti vetra, istočasno pa meritve izvaja tudi v predorski cevi. Rezultati validacije kažejo na zelo dobro sestavljene teoretične CFD-modele.

Razlika med teoretičnimi CFD-modeli in realnimi meritvami je do 5 %. To je zelo dober rezultat glede na številne predpostavke in poenostavitve pri izdelavi modelov (vetrovne karakteristike, koeficienti, izgube itd.). Pomembne so tudi ugotovitve, ki dokazujejo, da je sunkovitost lastnost, ki jo je smiselno upoštevati pri načrtovanju in upravljanju prezračevanja predora. Zasnovan je pristop k raziskovanju vpliva nestacionarnih vetrov na prezračevanje cestnih predorov s CFD-simulacijskimi tehnikami z integracijo lastnosti vetrov v robne pogoje. Opisani so ključni vetrovni scenariji, ki jih je smiselno uporabiti pri izdelavi varnostnih analiz za požar v cestnem predoru. Izdelovalec varnostnih analiz bo lahko za določen predor izbral tiste scenarije, kateri so relevantni za določen primer vetra. Rezultati validacije kažejo na ustreznost programa FDS za raziskovanje te vrste problematike, obenem pa tudi, da je uporaba predstavljenih poenostavitev in približkov pri zasnovi CFD-modelov, ustrezna.

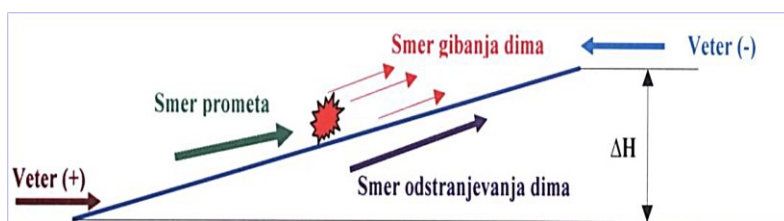
Predori so strateški objekti cestnega prometa, še posebej v goratih in hribovitih območjih, saj omogočajo hitro, varno in nemoteno prometno povezavo med ciljnim lokacijami. Prezračevanje enosmernih predorov na avtocestah je večinoma longitudinalno v smeri prometa. Mehansko prezračevanje je ključni segment varnosti, kadar je promet ogrožen zaradi požara v predoru. Zagotovljen mora biti ustrezen odvod dima in toplote iz predorske cevi, kar omogoča varen umik uporabnikov in gašenje.

Vetrovi, ki pihajo v smeri portala predora, pripomorejo k lažjemu prezračevanju ali ga zavirajo. Nekateri avtocestni predori v Sloveniji ležijo na območju z močnim vetrom. To so predori Kastelec, Dekani in Markovec, kjer pogosto piha močan in zelo sunkovit veter, imenovan burja. Prav zato je bil kot praktični primer raziskovanja izbran predor Kastelec ter močan in sunkovit veter burja s svojimi karakteristikami.

Mnogo dosedanjih raziskav, opredeljenih v strokovni in znanstveni literaturi, je bilo usmerjenih predvsem z upoštevanjem vpliva konstantnega vetra na prezračevanje cestnih predorov. Zato sem se v svojem delu posvetil učinkom močnih in sunkovitih vetrov, ki v marsičem spremenijo tehnične rešitve različnih scenarijev in protokolov delovanja prezračevanja cestnih predorov v izjemnih dogodkih, med katere spadajo tudi požari različnih moči in dolžin.

3.4 VPLIV VZDOLŽNEGA NAKLONA

Z razvojem avtocestne mreže v Republiki Sloveniji je bilo za premostitev razgibanega geografskega terena zgrajeno večje število avtocestnih predorov. Varnost na področju cestnih predorov se je v zadnjem desetletju zelo izboljšala na več različnih področjih, kot so prometna signalizacija, nadzor prometa, aktivni in pasivni požarni sistemi, prezračevanje idr. V grobem lahko cestne predore razdelimo na tiste, v katerih promet poteka dvosmerno (npr. Karavanke, Ljubelj), in tiste, v katerih promet poteka enosmerno (avtocestni predori). Ker je slednjih na območju RS veliko in so po večini dolgi ter skozi vsakodnevno potuje veliko število vozil, bodo njihove specifike predstavljene podrobneje. Tako se bo izraz predor v članku nanašal na enosmerne AC-predore, če ne bo drugače opredeljeno.



Slika 2: Vpliv vetra pri pozitivnem naklonu vozišča (Vir: DARS, 2017)

Predorov je na slovenski avtocestni mreži 45, skupne dolžine nekaj čez 42 km (*Slika 3*). Vsi novozgrajeni predori na našem ozemlju in v EU, ki so daljši od 500 m, morajo biti zgrajeni po EU Direktivi za predore, katera predpisuje obliko cevi, gradbene materiale, varnostne sisteme, evakuacijske in intervencijske poti ter nadzor in upravljanje predora. AC predori so večinoma dvopasovni, izjemoma pa imajo tri vozne pasove (Šentvid, Golovec). Promet poteka v vsaki cevi samo v eni smeri.

V predorih, daljših od 1700 metrov so zgrajene odstavne niše za vozila. Širina voznega pasu v predoru mora znašati najmanj 3,5 metra. Dvocevni predori imajo izdelane medsebojne povezave med cevema s prečniki, ki služijo kot evakuacijska ter intervencijska pot za dostop posredovalcev. Tak prečnik med obema cevema mora biti v medsebojnih razdaljah največ 400 metrov. Pomemben je tudi vzdolžni naklon predora, ki lahko v primerih, kjer ni drugačne možnosti izgradnje zaradi geografskih pogojev, znaša največ 5 %. Kjer je vzdolžni naklon večji od 3 %, so potrebni dodatni varnostni ukrepi, zato se predore poskuša graditi z vzdolžnim naklonom, manjšim od 3 %.

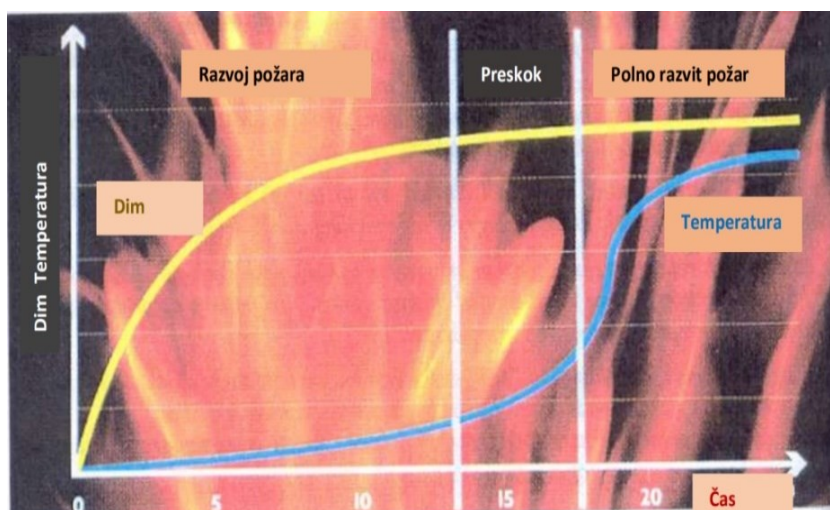
Vsi avtocestni predori na slovenskem ozemlju imajo vzdolžni naklon manjši od 3 %. S tem se zmanjša vpliv pojava dimnika pri požaru, predvsem pa bolj obremenjena tovorna vozila ne zgubljajo ali zelo pridobivajo na hitrosti, s čimer se zmanjša nevarnost za nastanek prometne nesreče.

stanie 1. lipca 2010



11

spusti navzdol, zapolni celoten prerez in s tem ogroža morebitne ljudi, ki bi se tam nahajali, in otežuje delo gasilcev, ki včasih zaradi trenutnih okoliščin vstopajo v predor skozi izhodni portal.



Slika 4: Naraščanje temperature in razvoj dima pri požaru v predoru, (Vir: splet, 2014)

Na Sliki 4 vidimo, da ni pomembno samo naraščanje temperature, ampak tudi to, da se dim začne razvijati zelo hitro, hitreje kot se dviga temperatura. Pri simulacijah smo analizirali razmere ob normalnem prometu, prometu z burjo ter prometu v primeru požara in požara z burjo v predoru.



Slika 5: Dim iz predora Trojane, (Vir: DARS, 2013)

V primeru požara pride do ti. stratifikacije, oz. plastenja različno toplih plasti zraka in dima. V nadaljevanju, v okviru simulacij prezračevanja praktičnega primera, so podani rezultati analiz,

ki dovolj zanesljivo opredeljujejo možnosti preprečevanja mešanja plasti v določenem časovnem intervalu $t = 180$ s, kar realno omogoči varen umik oseb, ki so v predoru v času izrednega dogodka - požara.

3.5.1 EVAKUACIJA POTNIKOV

V nadaljevanju podajamo nekatere splošne ugotovitve (Petelin & sodelavci, 2005). Vozila, ki se nahajajo za mestom požara (gledano v smeri premikanja vozil), bodo lahko zapustila predor nepoškodovana – brez stika s požarom. Del cevi predora za mestom požara se bo zato lahko hitro izpraznila. Zaželeno je, da se bo v najkrajšem času po izbruhu požara reducirala hitrost požarnih plinov v predorski cevi na 2 m/s, tako da se bodo pomikali požarni plini pod stropom do ustja predorske cevi v smeri vožnje.

Vozila, ki se bodo nahajala pred mestom požara, se bodo morala ustaviti čim dlje od požara. Na semaforjih, ki se nahajajo pred mestom požara, se morajo zato prižgati rdeče luči. Razsvetljava v predoru se avtomatsko preklopi na 100 % jakost. Ker dimni plini zelo hitro dosežejo strop predora in s tem zmanjšajo svetlobo notranje razsvetljave, bo kombinacija varnostnih svetilk in označb evakuacijskih poti/znakov povečala vidnost med požarom. Kombinirane požarne varnostne svetilke morajo zato biti montirane na višini enega metra in na razdalji 60 m. V primeru požarnega alarma se meritev koncentracije CO in prašnih delcev kot tudi potreb po zraku na osnovi prometnega toka ne upošteva. Da se požar in dim ne bi razširila v nasprotni smeri vožnje, morajo ventilatorji avtomatično delovati in doseči hitrost do 2 m/s v času 180 sekund v prerezu predora zaradi zahtev o stratifikaciji dima. Potreben pretok zraka je dosežen z vklopom določenega števila ventilatorjev. Smer gibanja zraka mora biti vedno v isti smeri kot pred požarom.

V sosednji cevi, kjer praviloma ni požara, je treba vzpostaviti nizek nadtlak, ki prepreči prehod dima skozi odprta vrata v pohodnih prečnikih. V projektu avtomatskega prezračevanja v primeru požara je predviden izklop vseh ventilatorjev v neogroženi cevi, kar morda ni najbolj ustrezna rešitev. Nadtlak v cevi, ki bo služila kot evakuacijska pot lahko dosežemo na ta način, da nekaj ventilatorjev v neogroženi cevi začne delovati v nasprotni smeri glavnega toka zraka, seveda pa je pri tem potrebno upoštevati, katera predorska cev je ogrožena, smer ter predvsem hitrost vetra.

Predvideni so različni scenariji delovanja impulznih ventilatorjev. Odvisni so od cevi predora (zahodna-spuščajoča se cev, za katero je prezračevanje manj kritično, ter vzhodna-dvigajoča se cev, kjer lahko burja povzroči precejšnje nevšečnosti tudi v normalnih obratovalnih pogojih), mesta požara ter meteoroloških okoliščin (smer in hitrost vetra na portalih). Scenariji prezračevanja v požarnem režimu za zahodno cev (smer Ljubljana-Koper) niso problematični,

ker se v smeri nasproti prometnemu toku ne pojavljajo močnejši zračni tokovi, ki so rezultat vetrov ali zračnega tlaka. Ventilatorja na vstopnem portalu lahko ostaneta vklopljena v vseh scenarijih, razen v primeru močnejšega vetra na vstopnem portalu (burja), ko le-ta preseže hitrost 3 m/s. Ventilatorja na izstopnem portalu se vključujeta po potrebi glede na smer in hitrost vetra.

3.6 VARNOSTNE NAPRAVE V PREDORU

Pod izredne dogodke v predoru se smatrajo tisti dogodki, trdi Suban (2016), kateri nepričakovano zmotijo normalno obratovanje predora. Mednje spadajo vožnja v nasprotni smeri, prekoračena emisija dimnih plinov, slaba vidljivost, požari, okvare vozil ter zaustavljena vozila, izlivi nevarnih snovi, pojav živali ali nepooblaščenih ljudi v predoru, izpadi električne energije ali druge okvare na predorskih sistemih, prometne nesreče ter tudi meteorološki dejavniki, kot je npr. močan veter, ki vpliva na prezračevanje predora. Izredne razmere pa lahko povzročijo tudi naravne katastrofe ter terorizem. Kot je takoj jasno, ti dogodki ogrožajo uporabnike predora - voznike in potnike, povzročijo pa lahko tudi večjo materialno in ekonomsko škodo.

Zaradi specifičnosti predorov se lahko navidezno nedolžna nezgoda hitro spremeni v katastrofo. Zato so predori opremljeni z večjim številom varnostnih sistemov in naprav, ki pomagajo preprečiti nastanek izrednega dogodka, ali pa poskušajo omiliti posledice le-tega. Oprema ter varnostni sistemi in naprave v predorih so: sistemi oskrbe z električno energijo, razsvetljava in prezračevanje predora, sistemi klica v sili, videonadzor in ozvočenje, sistem samodejnega zaznavanja izrednih dogodkov, predorske radijske naprave, oprema, naprave in sredstva za varstvo pred požarom, sistemi upravljanja prometa, omrežje za prenos podatkov ter centrale za upravljanje predora (*Slika 6*).



Slika 6: Oprema ter varnostni sistemi in naprave v predoru (vir: DARS, 2005)

Vodenje, krmiljenje in nadzor teh sistemov opravlja DARS-ov nadzorni center (*Slika 7*), lahko pa se izvaja tudi na lokaciji samega predora v pogonski centrali pomožnega centra. Nekaj od teh sistemov je smiselno predstaviti podrobneje, saj jih lahko ob izrednem dogodku uporabijo vsi, ki potujejo skozi predor oz. se lahko zanesejo nanje. Video-nadzorni sistem omogoča nadzor dogajanja v predoru.



Slika 7: Video-nadzorni sistem v predoru (vir: DARS, 2014)

Operaterjem omogoča ogled dogajanja na cestišču s pomočjo fiksnih in vrtljivih kamer. Kamere so povezane na video procesorje, računalnike, ki s pomočjo razpoznave slik in videa v nekaj sekundah zaznavajo izredne dogodke, kot so na primer stoječa vozila, vzvratna vožnja, predmete na cesti, pešce in tudi dim ob požaru ali meglo. Povezava z detekcijskim sistemom je izvedena na način, da se operaterju na zaslonih avtomatično prikaže območje, kjer je zaznan izredni dogodek. Sistem omogoča tudi izbor posameznih kamer ali niza kamer, kar se prikaže na več zaslonih v nadzornem centru. Gasilni aparati za gašenje vseh vrst požarov so nameščeni po celotni dolžini predora v posebnih nišah. Pri tem moramo opozoriti, da je gašenje požarov tekočih goriv s hidranti neprimerno in nevarno. (*Slika 8*).

Vsi vemo, čemu so namenjeni, malokdo pa ve, da ima vsaka niša gasilnega aparata v predorih vgrajen senzor, ki ob odprtju in dvigu gasilnega aparata sproži požarni alarm v predoru in direktno alarmira nadzorni center. Sočasno se sproži postopek zapiranja predora.

Tako se lahko (vsaj deloma poučena) oseba posveti gašenju požara z gasilnikom in ni potrebno iskati drugega načina za obvestilo o nastanku požara ali tudi druge nesreče v predoru. Videonadzor v nadzornem centru bo avtomatično preklupil na lokacijo dogodka, kjer je bil dvignjen gasilni aparat, operater pa bo sprožil protokol obveščanja in alarmira ustreznih služb ter postopke zaustavitve prometa. Še vedno pa je smiselno natančnejše podatke o nesreči, številu poškodovanih oseb ali drugi nevarnosti naknadno sporočiti telefonsko. Mobilno

omrežje v predorih deluje normalno zaradi nameščenih ojačevalcev signala, lahko pa uporabimo tudi SOS telefonsko nišo (*Slika 8*).



Slika 8: Gasilni aparati v posebnih nišah v predoru (vir: DARS, 2011)

Sistemov za obveščanje voznikov in drugih uporabnikov predora je več. Pred portali predorov so nameščene informacijske table (*Slika 9*), katere voznike obveščajo o zaprtju predora ter o raznih drugih dogodkih, kot je npr. delo na cesti in omejitev hitrosti.



Slika 9: Informacijska tabla pred predorom Kastelec (vir DARS, 2005)

Vozniki morajo biti vedno pozorni na informacije na tablah pred vstopom v predor! Pred predorom, kot tudi na določenih razdaljah po celotnem predoru, so nameščeni semaforji, ki voznike obveščajo ali je predorska cev v nadaljevanju odprta oz. ali je vožnja prepovedana (rdeča luč). Če se že vozite v predoru in naletite na rdečo luč na semaforju, se je treba zaustaviti.

Predori so dolžine tudi nekaj kilometrov in nesreča ali požar se je lahko dogodil v nadaljevanju predora po tistem, ko ste vanj zapeljali. Če bi z vožnjo nadaljevali, bi lahko prišli v neposredno bližino požara, kar za vas predstavlja večjo nevarnost, ob enem pa bi gasilcem otežili dostop do lokacije. Sistem semaforjev je zasnovan tako, da v primeru, ko se nesreča zgodi za vašim vozilom, se bodo rdeče luči na semaforjih prižgale pred lokacijo nesreče v smeri vožnje, za nesrečo pa bodo gorele zelene luči, kar omogoči nemoteno zapustitev predora. Na izredni dogodek v predoru pa voznike obveščajo tudi utripajoče rumene luči ter utripajoče talne luči na pločnikih. V primeru, da voznik opazi utripanje omenjenih luči, mora nameniti večjo pozornost na nastanek kakega dogodka.

V obnovljenih predorih je opaziti tudi dodatne modre luči na pločnikih. Te so nameščene vsakih 100 m in služijo za določanje varnostne razdalje med vozili. Dodatno zvočno obveščanje voznikov ob nesreči v predoru je izvedeno direktno iz nadzornega centra preko zvočnikov v predoru ter radijskih frekvenc Val 202. (*Slika 7*)

3.7 OBNAŠANJE OSEB OB IZREDNEM DOGODKU V PREDORU

Uporabniki predora velikokrat sedijo v svojem vozilu ter čakajo nadaljnje informacije, saj niso seznanjeni, kako je treba ukrepati. Včasih mislijo, da je samo zastoj, zato čakajo, da se začne kolona pomikati. Pogosto je prisoten tudi strah. Poročilo požara v predoru Mont Blanc (1999) nam razkriva, da so bile nekatere žrtve, ki so umrle zaradi vpliva požara, še vedno pripete na sedežu v avtomobilu. Osebe, ki se umikajo na varno, se raje gibljejo vzdolž predora, namesto, da bi uporabili prečne zasilne izhode. S tem se čas samoreševanja podaljšuje, posredovalci pa morajo pričakovati, da se bodo osebe gibale po cestišču v smeri njihovega prihoda in je zato potrebna večja pazljivost. V mnogih primerih prihaja tudi do vzvratne vožnje, ker se osebe želijo oddaljiti od požara. Na osnovi analiz v nadaljevanju navedenega izrednega dogodka, podajamo nekatere ugotovitve, ki omogočajo boljše razumevanje gibanja zraka v predoru.

Takšen primer se je zgodil tudi ob požaru v severni (desni) predorski cevi v predoru Trojane (2010), ko so se prav vsa vozila, vključno s tovornimi, ki so se ustavila pred mestom nesreče, vrnila v smeri vožnje proti vstopnemu portalu predora. S tem so ogrožali tako sebe kot gasilce in ostale reševalce, ki so napredovali v smeri izrednega dogodka. Tudi v primerih, ko osebe zapustijo svoje vozilo v predoru, ostane vozilo pogosto ustavljeno na prometnem pasu na tak način, da je prehod z intervencijskimi vozili otežen ali nemogoč. To se dogodi v večini primerov zaradi nepoznavanja pravilne postavitve, paničnega odziva ali strahu zaradi stresa ob izrednem dogodku. Večinoma vozniki s seboj vzamejo avtomobilske ključe, tako je premik vozil s strani posredovalcev otežen oz. pri tovornih vozilih nemogoč. Pri požarih v stanovanjskih objektih se velikokrat osebe umaknejo pred nevarnostjo npr. v omare, pod postelje ipd. Tudi v predorih so poznani primeri, ko so se osebe skrile pred požarom v hidrantne

ali telefonske niše, kar lahko nudi zavetje ali samo daje občutek varnosti. V poročilu o požaru v predoru Tauern – Avstrija (1999) je zapisano, da so gasilci rešili 3 osebe iz predora, ki so se pred dimom in požarom zatele v telefonsko nišo (celico). Osebe se lahko nahajajo tudi v vozilih, v katere se lahko zatečejo pred vplivi požara. Uporabniki večinoma tudi ne poznajo pravih postopkov umika iz predora, delovanja predorskih sistemov in protokola operaterjev v nadzornem centru ob nesreči ali požaru. Ob nesreči oz. požaru na določenem mestu v predoru, se najprej zaustavi promet od vhodnega portala v predor do lokacije dogodka, od točke nesreče naprej pa je promet še vedno sproščen, da vozila za nesrečo odpeljejo iz predora.

Sočasno se v celoti zaustavi tudi promet v sosednji predorski cevi. To se izvede iz dveh namenov, in sicer, da se lahko uporabniki predora preko prečnikov evakuirajo iz ogrožene cevi v sosednjo neprizadeto cev in pri tem niso ogroženi zaradi prometa ter, da se omogoči intervencijskim službam nemoten dostop in delo v neprizadeti cevi. Vozniki morajo svoja vozila zaustaviti skrajno levo in desno na vozišču, da se po sredini cestišča omogoči vožnja intervencijskih vozil. Pomembna je tudi, da se ob zapuščanju vozila pustijo ključe v vozilu. Tako lahko vozila gasilci in druge službe po potrebi premaknejo.

Glede umika pa je treba vedeti, da prezračevanje v naših dvocevnih predorih poteka vzdolžno v smeri vožnje in v tej smeri se odvaja ves dim in toplota požara. Zato se v primeru evakuacije ob požaru peš umikamo ob robu cestišča v nasprotni smeri vožnje do najbližjega prečnika in nato v sosednjo predorsko cev (*Slika 10*). Na spletni strani Družbe za avtoceste Republike Slovenije (DARS-a) je objavljena brošura Varno skozi predor, v kateri so objavljeni napotki ob izrednih dogodkih v predoru in katere bi morali poznati vsi vozniki.



Slika 10: prečni prehod v dvocevnem predoru (vir: DARS, 2015)

3.8 VZDOLŽNO PREZRAČEVANJE

V izrednih razmerah, še posebno v primeru požara je izrednega pomena zanesljivost električnega napajanja ventilatorjev in usposobljenost operaterjev za upravljanje z ventilatorji. Operaterji morajo biti usposobljeni vzdrževati primerno atmosfero v predoru za varno samoreševanje in evakuacijo uporabnikov predora ter kasneje za reševanje in gašenje. Dobro morajo poznati pojave generacije dima in razprostiranja v predoru v vseh mogočih vremenskih in prometnih razmerah v odvisnosti od jakosti požara.

3.9 KRITIČNA (MEJNA) HITROST ZRAKA V PREDORSKI CEVI

Da dosežemo skoraj mirujoče stanje, smo vpeljali pojem mejne, oz. kritične hitrosti zraka v predoru. Velikost kritične hitrosti se giblje okoli 1,5 m/s, kar še preprečuje nastanek *povratnega toka*. Kritična hitrost je torej tista hitrost gibanja zraka v predoru, ki nam zagotavlja, da v primeru požara ne bo prišlo do povratnega gibanja dima, kar pomeni, da se pod kritično hitrostjo pojavlja povratno gibanje dima (*slika 11 in 12*).

Ne moremo mimo dejstva, da je dim glavni vzrok za nastale žrtve pri požaru v predoru. (PEI Gui-hong, ZHANG Qiu-yi, 2019).

S poglobljenim poznavanjem kritične hitrosti zraka v predoru lahko podrobneje prikažemo gibanje dima v predoru. Toplotno sevanje iz žarišča požara je v večini primerov vzrok, da se segrevajo vsi gorljivi predmeti, ki so v neposredni bližini, niso pa v direktnem stiku s požarom. Ko se gorljivi predmeti segrejejo do temperature samovžiga, se vžgejo in požar se razširi. Dim, ki nastaja pri požaru in se zaradi vzgona dviga, se nabira pod stropom prostora in tvori sloj vročega dima (*Slika 13*). Oblika, debelina, temperatura in sestava sloja dima se spreminjajo s potekom oz. razvojem požara.

Na *Sliki 13* je tipična krivulja časovnega poteka požara (dima in temperature). Na *Sliki 13* vidimo tudi, da ni pomembno samo naraščanje temperature, ampak tudi to, da se dim začne razvijati zelo hitro, hitreje kot se dviga temperatura (Modic, 2021).

V fazi naraščajočega požara, ki sledi fazi nastanka požara, se zaradi že navedenih vzrokov požar razširi. Nastanejo nova žarišča, ki tudi sproščajo dim in oddajajo toploto. Dim se na žariščih požara dviga proti stropu, v steber dvigajočega se dima pa se doteka na začetku svež zrak, kasneje pa tudi s produkti zgorevanja kontaminiran zrak.

Preizkusi kažejo, da se pri hitrosti, višji od 1.50 m/s, dimna plast pomika v pozitivni smeri, torej v smeri prometnega toka. Povratnega gibanja dima praktično ni.

3.9.1 ODVISNOST KRITIČNE HITROSTI ZRAKA OD TLAKA VETRA SPREMENLJIVIH SMERI

Za namišljen predor dolžine 1000 m, prometom 800/200 vozil, s 4 pari delujočih ventilatorjev in požarom moči 30 MW na sredini predora, simulacija kaže, da je kritična hitrost zraka neodvisna od hitrosti oziroma tlaka burje. (*Preglednica 1*).

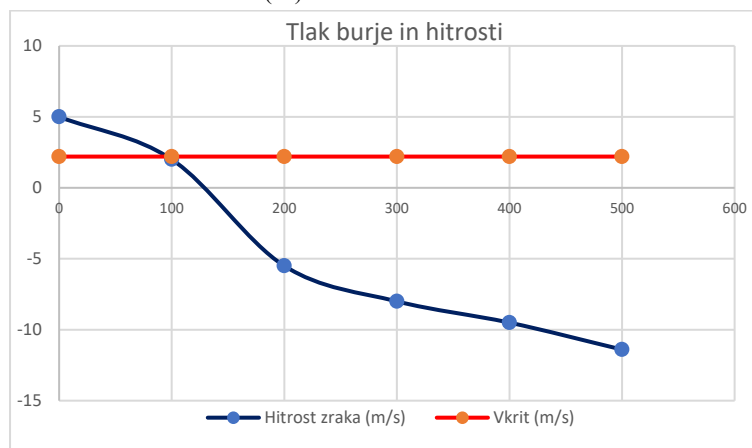
Pri tem niso toliko pomembni rezultati ampak konstantnost kritične hitrosti zraka v predorski cevi. Podobna in bolj poglobljena analiza je bila narejena za vzhodno cev predora Kastelec, ki jo obravnavamo v okviru reševanja praktičnega primera.

Preglednica 1: Odvisnost med tlakom in hitrostjo burje in hitrostmi v predora

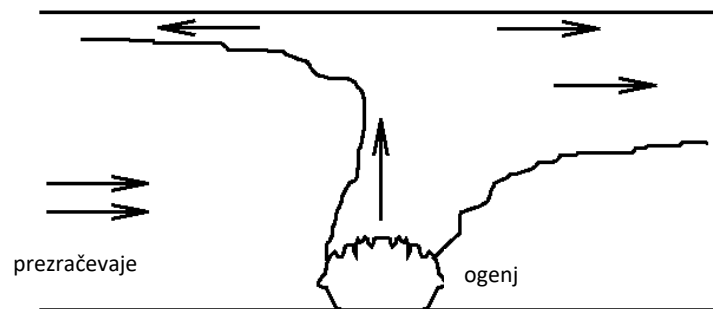
TLAK BURJE Pa	HITROST BURJE 1 m/s	HITROST BURJE 2 km/h	HITROST ZRAKA m/s	KRITIČNA HITROST m/s
0	0	0	5.0	2.20
100	12.5	45	2.0	2.20
200	17.5	63	-5.5	2.20
300	22	77	-8.0	2.20
400	25	90	-9.5	2.20
500	27.70	100	-11.4	2.20

Graf 2 prikazuje odvisnost hitrosti zraka in (ne)odvisnost kritične hitrosti zraka od tlaka oziroma hitrosti burje.

Graf 2: Prikaz odvisnost hitrosti zraka in (ne)odvisnost kritične hitrosti zraka od tlaka oziroma hitrosti burje.

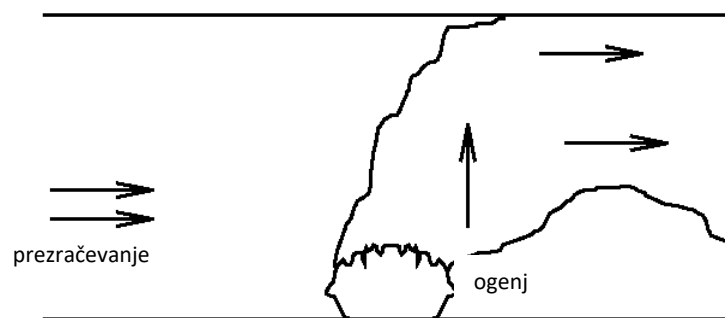


Na Sliki 11 je prikazano stanje v primeru (zelo) majhne hitrosti zraka, ko se povratna plast sicer tvori, a se ne spušča k tlom, mešanja plasti dima in ostalega zraka skoraj ni, potniki se lahko umaknejo. Podajamo nekatere splošne ugotovitve (Petelin & sodelavci, 2005).



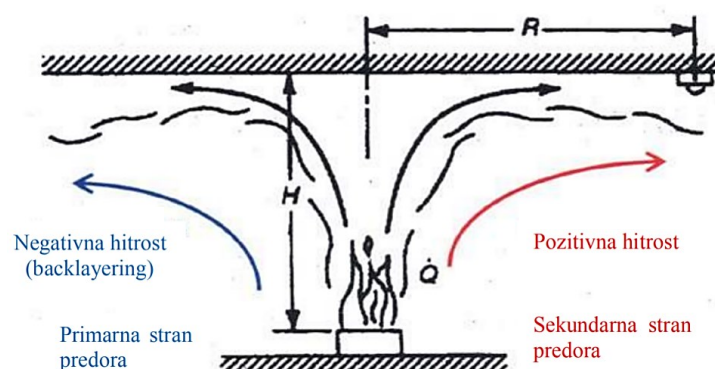
Slika 11: Nezadostno prezračevanje v predoru, ker požar povzroča povratni tok zraka, (Vir: Petelin, 2005)

Na Sliki 12 je prikazano, da se pri večji hitrosti zraka v predoru hladen zrak hitro meša z vročim dimom. Povratne plasti sicer ni, se pa v sekundarnem delu dim hitro spušča k tlom, kar pomeni, da so potniki lahko ogroženi, oz. se ne morejo pravočasno rešiti.



Slika 12: Zadostno prezračevanje v predoru, požar ne more povzročiti povratnega toka zraka, (Vir: Petelin, 2005)

Na Sliki 13 je podan primer pojava negativne hitrosti, ki v realnem okviru predstavlja grožnjo, da bo evakuacija udeležencev v prometu težko izvedljiva brez posledic, ker je širjenje dima in s tem tudi strupenih in škodljivih plinov zaradi pojava negativne hitrosti, neizbežno.



Slika 13: Širjenje dima in toplote s toplotnim sevanjem pri različnih hitrostih zraka v predoru, (Vir: Modic, 2021)

Kritična hitrost zraka v predoru je prav gotovo najbolj pomemben parameter za določitev učinkovitosti vzdolžne ventilacije v primeru požara. Označena je kot "najmanjša" vzdolžna hitrost zračnega toka, ki je povprečena preko svetlega prečnega prereza, pri kateri je dim

"odstranjen". Glavna zahteva za uspešno odvajanje dima je doseči tolikšno kritično hitrost zraka, da je nedvoumno omogočena intervencija gasilcev ter njihovo varno delo pri gašenju požara. Nezanosljivi ventilacijski sistemi, ki ne zagotavljajo kritične hitrosti zraka v primeru požara, neposredno ogrožajo gasilce, ki so vstopili v predor in pričeli gasiti, pa tudi potnike, ki se umikajo preko nezadimljenega dela predorske cevi proti izhodu, ali v drugo predorsko cev ali v zaklonišče. (Povzeto po Donjerković Petar, Miodrag Drakulić, 2000)

V času 10 minut se mora zagotoviti take razmere, da se vstopni hladni zrak ne meša z vročimi dimnimi plini požara, kar pomeni, da se del dimnih plinov v času $t = 180$ s premakne na pozitivno/primarno stran predorske cevi, tj. območje do požara. V tem času lahko prečnike dosežejo vsi potniki (avtomobili, avtobusi, ipd.). Prečniki so medsebojne povezave med predorskima cevema, ki se nahajajo na približno vsakih 350 do 400 metrov po celotni dolžini predora.

3.9.2 ENAČBE ZA DOLOČANJE KRITIČNE HITROSTI ZRAKA

Na *Slikah 11 in 12* so prikazane razmere v odvisnosti od kritične hitrosti zraka, ni pa razloženo, kako to kritično hitrost določimo, oziroma izračunamo. Kritična hitrost je tista hitrost gibanja zraka v predoru, ki nam zagotavlja, da v primeru požara ne bo prišlo do povratnega gibanja dima. To je torej mejna hitrost, pri kateri se še pojavlja povratno gibanje dima.

Matematični postopek določitve enačbe za kritično hitrost je naslednji:

$$F_r = \frac{g \cdot H \cdot (\rho - \rho_d)}{\rho \cdot u^2} \quad (8)$$

ali

$$F_r = \frac{(g \cdot H)}{u^2} \cdot \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho}\right) \quad (9)$$

Plinska enačba idealnega plina je: $p = \rho \cdot R \cdot T$ (10)

ker je tudi $\frac{\rho_d}{\rho} = \frac{T}{T_d}$ (11)

je $F_r = \frac{g \cdot H}{u^2} \cdot \left(1 - \frac{T}{T_d}\right)$ (12)

Ob upoštevanju konstantne generacije dima, in če ni prenosa toplote na stene predora, je masna bilanca:

$$m \cdot c_p \cdot T + Q_k = m \cdot c_p \cdot T_d \quad (13)$$

Od tu dobimo $T = \frac{m \cdot c_p \cdot T_d - Q_k}{m \cdot c_p}$ (14)

oziroma
$$F_r = \frac{g \cdot H \cdot Q_k}{m \cdot c_p \cdot T_d \cdot u^2} \quad (15)$$

V našem primeru je masni pretok
$$m = \rho \cdot A \cdot u \quad (16)$$

Če vstavimo podatke za kritične razmere, je:

$$F_{rc} = \frac{g \cdot H \cdot Q_k}{\rho \cdot A \cdot c_p \cdot T_d \cdot u_c^3} \quad (17)$$

Tako je enačba za kritično hitrost:

$$u_c = \sqrt[3]{\frac{g \cdot H \cdot Q_k}{F_{rc} \cdot \rho \cdot A \cdot T_d}} \quad (18)$$

Če zapišemo, da je
$$K_1 = F_{rc}^{-0.33} \quad (19)$$

je
$$u_c = K_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{g \cdot H \cdot Q_k}{F_{rc} \cdot \rho \cdot A \cdot T_d}} \quad (20)$$

Ali znana Kennedyjeva enačba
$$u_c = K_1 \cdot K_n \left(\frac{g \cdot H \cdot Q}{\rho_0 \cdot c_p \cdot A \cdot T_D} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

Pri tem je v enačbah 8 do 21:

A	čisti prerez toka fluida
c_p	specifična toplota zraka
Q	skupna toplota pri zgorevanju, $Q = Q_k + Q_s$
Q_k	konvekcijska toplota
Q_s	sevalna toplota
F_r	Freudovo število pri zračnem toku ob požaru
F_{rc}	kritično Freudovo število
g	zemeljski pospešek
H	karakteristična dolžina sile vzgona; razdalja od točke požara do najvišje točke
K_1	$F_{rc}^{-0.33}$
K_n	stopenjski faktor
m	masni pretok zraka do mesta požara
p	absolutni zračni tlak
R	plinska konstanta
T	temperatura vstopajočega zraka
T_d, T_D	povprečna temperatura dimnih plinov
u	hitrost vstopajočega zraka
u_c, v_c	kritična hitrost zraka
ρ, ρ_0	povprečna gostota vstopajočega zraka
ρ_d	povprečna gostota dimnih plinov

V predorih, kjer je zračni tok zaradi hladnejšega svežega zraka usmerjen navzdol, je kritična hitrost zraka lahko večja, kot če bi jo izračunali po enačbi (21).

Froudovo število = razmerje med vzgonskimi silami, ki jih povzroča požar, in vztrajnostnimi silami zaradi vsiljenega prezračevalnega pretoka zraka.

$$F_r = \frac{v^2}{g \cdot D} \cdot \left(\frac{T_f - T_0}{T_f} \right) \quad (22)$$

Kjer je

v	Hitrost zraka	[m/s]
g	gravitacijski pospešek	[m/s ²]
D	Dolžina	[m]
T _f	T _f = T _o + 273K	[K]
T ₀	T ₀ = T + 273K	[K]

Kennedy je z ekipo kot brezdimenzijsko število določil kritično Froudovo število v vrednosti 4,5, ki pa očitno ni čisto konstantno. Razlog je v tem, da v obokanih predorih vedno obstaja kratka povratna plast.

3.9.3 IZRAČUN KRITIČNE HITROSTI ZRAKA

Za izračun kritične hitrosti zraka so bile najpogostejše uporabljane štiri enačbe (modeli), ki so plod raziskav (William D. Kennedy, 1996), (Ben P. Rigter, 2003), (Fathi Tarada, 2010), (K. Brahim, B. Mourad, E. C. Afif and B. Ali, LETTM, 2013) in (PEI Gui-Hong, ZHANG, 2019):

1) Danziger & Kennedy (R_{ic}):

$$v_{crit} = \left(\frac{g H Q}{\rho c_p A T_0 R_{ic}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (23)$$

Leta 1982 sta Danziger in Kennedy predstavila formule za izračun kritične hitrosti zraka v odvisnosti od hitrosti oddane toplote na podlagi metode SES (Subway Environmental Simulation). Kennedy je izpeljal formulo kritične hitrosti, ki je bila istega leta uporabljena tudi pri projektu Metro, okoljske simulacije oddelka za promet v ZDA.

2) Thomas & Froude (T_f):

$$v_{crit} = K_g K \left(\frac{g H Q}{\rho c_p A T_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho c_p A v_{crit}} + T_0 \quad (25)$$

Na podlagi Froudovega števila je razmerje med kritično hitrostjo zraka in hitrostjo sproščanja toplote prvi pridobil Thomas. Thomas je predstavil kritično Froudovo število za napovedovanje kritične hitrosti. Ko je bilo kritično Froudovo število enako 1, je pojav povratnega platenja izginil, pridobljen je bil model napovedi kritične hitrosti zraka.

$$3) \text{ Froude (po Kennedyju) } (F_{rm}): \quad v_{\text{crit}} = \left(\frac{g H Q}{\rho c_p A T_f F_{rm}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (26)$$

$$T_f = \frac{Q_c}{\rho c_p A v_{\text{crit}}} + T \quad (27)$$

$$F_{rm} = 4,5 \times (1 + 0,0374 \times |\min(\text{grade}, 0)|^{0,8})^{-3} \quad (28)$$

Ta model razlaga lastnosti toka dima v predoru glede na omejeno število predpostavk. Danziger in Kennedy sta pozneje predlagala izboljššan model, vrednost Froudovega števila je 4,5.

4) Kennedy (*Ken*):

V predorih, kjer je zračni tok zaradi hladnejšega svežega zraka usmerjen navzdol (naklon), je kritična hitrost zraka lahko večja, kot če bi jo izračunali po enačbi (23).

Kennedy je s povezavo višanja temperature vročih plinov s hitrostjo konvektivnega sproščanja toplote Q iz požara, predlagal formulo za kritično hitrost zraka, in sicer uvedemo:

- naklon (-2%), računsko vzamemo 1 (za vožnjo po ravnem in navzdol):

$$K_n = K_g = 1 + 0,0374 \cdot (\text{naklon})^{0,8} \quad (29)$$

- če naklona ni, je $K_n = K_g = 1.00$

in dobimo:

$$v_{\text{crit}} = K_g K_1 \cdot \left(\frac{g H E_c}{\rho c_p A T_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (30)$$

Leta 1996 so rezultati preizkusov požara v predoru Memorial v Združenih državah Amerike pokazali, da je bila napoved kritične hitrosti po zgornji formuli višja za 5-15%, kar smo z izračuni po teh enačbah (modelih) dokazali tudi v preglednicah 3 do 6.

Izrazi v enačbah od 22 do 30 pomenijo:

Δp	tlačna razlika	[Pa]
k	stopenjski faktor	-
ρ	gostota zraka = 1,1	[kg/m ³]
v_{crit}	kritična hitrost zraka v predoru	[km/h]
K_g, K_n	korekcijski koeficient naklona	[%]
T	izmerjena temperatura (Danziger & Kennedy)	[K]

T_o	$T_o = T + 273K$	[K]
T_o	izračunana temperatura	[K]
R_{ic}	Richardsonovo število	[4,5]
T_f	$T_f = T_o + 273K$ (Thomas & Froude)	[K]
K	brezdimenzijsko število	[-]
Q_c, E_c	konvekcija	[MW]
F_{rm}	Freudovo kritično število	[-]
N	grade = naklon	[%]
Ken	Kennedyjeva enačba	[-]
A	površina svetlega prereza predora	[m ²]
c_p	specifična toplota zraka	[J/kgK]
Q	skupna toplota pri zgorevanju, $Q = Q_k + Q_s$	[MW]
Q_s	sevalna toplota	[MW]
H	karakteristična višina	[m]
H	razdalja od točke požara do najvišje točke pod stropom	[m]
K_l	$F_r^{-0.33}$	[-]
P	absolutni zračni tlak	[Pa]

Preglednica 2: Vhodni podatki pri izračunih moči požarov v enačbah 23 do 30

Q_c	$Q_c = Q \cdot E_c$	MW	izberemo $Q_c = Q \cdot 0,9$
Q		MW	
ρ	1,10	kg/m ³	
H	4,70	m	
c_p	1040	J/kgK	
A	57,00	m ²	
T_i	273,00	K	
R_{ic}	4,50	/	
g	9,81	m/s ²	
F_{rm}	4,0376	/	
n	-2,00	%	računsko vzamemo $n = 0,98$
E_c		MW	vzamemo 90% vrednosti Q
K_g, K_n	0.6057		
K_l	1		
K, k	0.61		

3.9.4 KENNEDYJEVA ENAČBA

Najnižjo konstantno hitrost dovedenega zraka v predorski cevi, ki se premika proti ognju, imenujemo *kritično hitrost*, ki je potrebna za odstranjevanje dima in preprečevanje povratne plasti, smo izračunali po Kennedyjevi enačbi.

Računalniški program IDA RTV (2017) omogoča izvedbo različnih simulacij scenarijev z uporabo numerične metode, ki je vanj vgrajena. Bistvena prednost je tem, da je moč upoštevati različne parametre gibanja zraka v predoru. Obsežne simulacije, ki so bile izvedene za potrebe

računanja prezračevanja vezane na praktični primer, so pokazale, ob upoštevanju nekaterih merilnih rezultatov, da so rezultati dobra osnova za realno oceno uspešnosti vodenja prezračevanja v normalnih in izrednih dogodkih, med katere spadajo požari različnih moči. Pomembno je, da je za preverjanje varnosti pred požari v cestnih predorih, treba izvesti večje število simulacij tako, da se kot vhodni podatki uporabijo mejne vrednosti posameznih veličin.

Kennedy je izpeljal formulo za kritično hitrost, ki je bila leta 1982 uporabljena pri simulaciji prostorskega projekta Metro, podzemne železnice s strani Ministrstva za promet ZDA (PEI Gui-hong, ZHANG Qiu-yi, 2019):

$$V_c = K_g k \cdot \left(\frac{g H Q}{\rho c_p A T_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (31)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho c_p A V_c} + T_0 \quad (32)$$

Kjer je:

T_0	temperatura zunanjega zraka	[K]
k	brezdimenzijski koeficient	[0,61]
K_g	korekcijski koeficient naklona	[-]

Druge oznake za posamezne veličine so podane v pomenu oznak pri predhodno navedenih enačbah.

Pri obravnavanju požarov v predorih se mora analizirati povratno gibanje dima, vpliv prezračevanja, dolžina plamena, kritična hitrost, ter s tem v zvezi razmere v predoru. Ravno tako so pomembni podatki o emisijah različnih plinov, zlasti ogljikovega monoksida, vidljivosti, itd. Po katastrofalnih požarih v predorih ob prelomu stoletja, ki so zahtevali poleg materialne škode tudi večje število človeških življenj, se je strokovna javnost močno usmerila v natančnejše in z znanstvenimi dokazi podkrepljene raziskave. Pregled nesreč kaže, da je njihova pogostnost zelo različna. Kljub nasprotnemu mnenju vidimo, da so nesreče v zadnjem času relativno redke, če upoštevamo število nesreč na dolžino vseh predorov, ki so v obratovanju. To je posledica zagotavljanja višje ravni varnosti, izboljšane kakovosti vozil, in ne nazadnje tudi posledica razvoja in napredka gradnje in izpopolnjene elektro-strojne opreme, podprte z digitalizacijo upravljanja tovrstnih objektov. Pregled pomembnejših raziskav s tega področja kaže, da se s to problematiko ukvarja veliko število tako domačih, kakor tudi tujih avtorjev. (Povzeto po ugotovitvah Conrad Stacey, Michael Beyer, Stacey Agnew, 2020)

Oka in Athinson (1997) sta izvedla poskus z modelom v merilu 1:10 in ga primerjala z rezultati predhodnih testov, ki so bili izvedeni v naravni velikosti. Na podlagi Froudovega merila podobnosti in primerjalne analize eksperimentalnih podatkov je bilo ugotovljeno, da je bila

kritična hitrost zraka v predoru sorazmerna $1/3$ moči stopnje oddane toplote. Ugotovili so tudi, da je kritična hitrost zraka v predoru neodvisna od hitrosti oddajanja toplote pri gorenju. To je razvidno iz enačb (30) in (31) ter prikaza na Grafu 4.

Celovite simulacije gibanja zračnega toka v predorih in izračuni z vedno boljšimi programskimi orodji omogočajo, da se teoretični izračuni kritične hitrosti zraka v predoru približujejo realnemu stanju v predorih. Poleg sofisticirane programske opreme, se pri vnosu vhodnih podatkov osredotoča na čim več pomembnih parametrov z namenom, da se jih skuša upoštevati na način velikosti stopnje vpliva posameznega na končni rezultat analize.

V našem primeru smo pri eksperimentalnih izsledkih uporabljali rezultate domačih testov in rezultate testov iz predora Memorial (ZDA). Tako smo analizirali podatke o stopnji oddane toplote (HRR - Heat Release Rate), temperature, koncentracije škodljivih plinov (NO_x , CO, dim, itd.), hitrosti zraka, oz. dima, sevanje, in obnašanje dima.

Ravno testi v predoru Memorial (ZDA), kjer je Bill Kennedy, ki je bil vodilni inženir na področju določanja kritične hitrosti zraka v predoru, so bili vodilo za poglobljeno analizo koncepta kritične hitrosti. Bil je avtor več znanstvenih člankov o kritični hitrosti, v katerih je poudarjal, da so nekatere prezračevalne zmogljivosti predorov bistveno pretirano zasnovane. Večkrat je predstavnike stroke s področja prezračevanja povprašal, če je koncept „kritične hitrosti“ zlorabljen, oz. koliko ukrepov resnično potrebujemo za prezračevanje predorov v primeru požara v predoru?

Sam je zagovarjal trditev, da je treba zagotoviti dovolj močan vzdolžni pretok zraka v predoru, da se izognemo povratni plasti, kar velja tako za glavni predorski cevi kot tudi za vse prečnike, ki jih povezujejo na predpisanih vzdolžnih razdaljah.

Kennedy je razpravljal o vplivu intenzivnosti požara na kritično hitrost (glede na temperaturo na mestu požara) in o medsebojnem vplivu zraka iz predora z zrakom, ki nastane med zgorevanjem (Kennedy, 1997). Kennedyjeva enačba za kritično hitrost zraka ne vključuje takšnih vplivov, vendar je bila po primerjavi s pridobljenimi podatki požara v naravni velikosti predlagana za simulacije požara.

Pričakuje se, da se bo hitrost oddane toplote na nek način normalizirala glede na dolžino požara vzdolž predora. Upoštevajoč zgoraj omenjene obsežne podatke o stopnji oddane toplote, Kennedyjeva enačba verjetno do sedaj ostaja najboljši način računske ocene kritične hitrosti zraka za potrebe načrtovanja cestnih predorov (brez prilagojenega CFD). To dejansko zahteva prilagoditev izračuna temperature na mestu požara z upoštevanjem dimenzij in jakosti požara, značilnosti in načina zgorevanja, interakcije zrak/požar, ipd., glede na geometrijo predora.

Analiza več računalniških programov je pokazala, da obstaja cela vrsta različnih programov, ki so večinoma nepopolni, kar pomeni, da vsakemu nekaj manjka. Trenutno je najpopolnejši program IDA – RTV (2017), saj omogoča izračun prezračevanja, vzdolžnega, polprečnega in prečnega, simulacijo požarov, določanje tipa vozil in njihovih karakteristik, emisij, itd. Program IDA RTV ima še več možnosti, ker je moč izvajati simulacije prezračevanja v katerih se analizira več priključkov in odcepov, dušenje zvoka, ipd. Poleg navedenega je možno dimenzionirati tudi predore s polprečnim ali prečnim prezračevanjem, sestavljene predore, itd. Vsebuje nabor poudarkov o ventilatorjih, itd. Vsekakor je zelo primeren za analizo razmer v predoru, za simulacijo, oceno in validacijo.

Izračuni in simulacije kažejo, da je v večini primerov ob požaru kritična hitrost zraka v predoru 2.20 do 2.40 m/s.

Priporočila PIARC zahtevajo ob izbruhu požara v predoru, da je hitrost gibanja zraka v predoru do 1.50 m/s, po možnosti v pozitivni smeri. Ugotovimo lahko, da ta hitrost pomeni povprečno hitrost gibanja zraka pred izbruhom požara. Ko požar izbruhne, se na samem mestu požara (zaradi kontinuitete) zaradi generacije dima, hitrost precej poveča. Povprečna hitrost je večinoma manjša od kritične, kar pomeni, da praviloma prihaja do povratnega gibanja dima. Na osnovi eksperimentov smo ugotovili, da pri hitrostih gibanja zraka do 3.00 m/s povratno gibanje ne povzroča težav, ker dim v prvi fazi reševanja ostane tudi v povratni (negativni) coni pod stropom. Ko poženemo ventilatorje, pa se celotna količina dima (pred in za požarom) začne pomikati proti izhodu, torej v pozitivni smeri, stratifikacija dima pa počasi razpada.

Ko je gibanje zraka in dimnih plinov povzročeno s potisnimi ventilatorji, govorimo o prisilni konvekciji. Mešanje delcev se vrši predvsem zaradi vztrajnostnih sil, ki lahko prevladujejo nad vzgonskimi, zato je prestop toplote še intenzivnejši, kot pri naravni konvekciji.

4. METODE RAZISKOVANJA

Obsežne simulacije in analize so bile izvajane s programom IDA RTV (2017). Program omogoča analizo zračnih tokov v cestnem predoru v povezavi z emisijo vozil, rezultat tega je izračun koncentracij posameznih škodljivih sestavin v predoru, kot so CO, NO_x, dim in saje. Omogočeno je proučevanje in analiziranje normalnih in higienskih razmer v predorih, kakor tudi požarnih scenarijev prezračevanja v času obratovanja predorov. Proučujemo lahko vzdolžno, polprečno in prečno prezračevanje, z možnostjo upoštevanja enosmernega ali dvosmernega prometa. Omogočena je tudi študija dinamike prometa, tj. normalnih prometnih tokov, zghostitev in zastojev v prometu.

Rezultati simulacij, ki so bile narejene z uporabo računalniškega programa IDA RTV (2017), prikazujejo zračne tlake in temperature zraka, pretoke in količine zraka ter koncentracije škodljivih snovi, ki so razporejene vzdolž analizirane predorske cevi. Vhodni podatki so geometrija cevi predora, vključno s trenjem pretoka zraka po obodu predorske cevi, gostote in razmerja vozil v prometu, kakovosti, oziroma emisij vozil ter hidrometeorološki podatki, ki veljajo za območje, kjer je predor umeščen v okolje.

Obsežne simulacije prezračevanja v cestnih predorih, katerih rezultati so podani v Poglavju 6, kjer je obdelan praktični primer določanja parametrov prezračevanja za konkreten predor. Glede na izrazito problematiko vpliva burje na obratovanje dvocevne cestnega predora Kastelec, kjer močno izstopajo težave v prezračevanju, predvsem kadar je burja zelo agresivna in piha s hitrostjo tudi več kot 130 km/h, smo izvajali pri različnih velikostih parametrov vhodnih veličin v vzhodni (levi) cevi predora Kastelec. V predorski cevi poteka enosmerni promet po dveh pasovih v smeri Koper – Ljubljana.

Pri analizi podatkov, dobljenih z navedenimi računalniškimi simulacijami, smo uporabili različne podatke in parametre, najbolj pa nas je zanimala kritična (mejna) hitrost zraka v predoru, ki je izrazito odvisna od hitrosti burje.

Kritično hitrost zraka smo pri različnih pogojih in veličinah določali tudi računsko in hkrati med seboj primerjali rezultate dobljene z različnimi enačbami, ki se v praksi pogosto uporabljajo za določanje tovrstnih parametrov, ki so služile temu namenu. Rezultati so prikazani v preglednicah v nadaljevanju.

Upoštevali oz. uporabili smo naslednja pomembna računska orodja za določitev parametrov prezračevanja cestnih predorov:

- enačbe, ki pokrivajo to področje
- Kennedyjevo enačbo

- izračune in rezultate izračunov
- določili kritično mejno hitrost zraka na več načinov
- ugotavljali in primerjali odvisnosti med posamezni vhodnimi in izračunanimi parametri.

Cilj obsežnih izvedenih simulacij in izračunov je bila med drugim preveritev izračunanih parametrov pri različnih pogojih z uporabo Kennedyjeve enačbe.

To so bili:

- temperatura zraka v predorski cevi
- koncentracija dima (vidljivost)
- koncentracija strupenih plinov (CO, NO_x) v predorski cevi,
- kakor tudi hitrost zraka in s tem možnost nezaželenega pojava povratnega toka
- spremembe zračnega tlaka zraka v predorski cevi.

4.1 MATEMATIČNI MODEL PREDORA

Povzeto o zapisih (Modic 2021), predorsko cev lahko ponazorimo s cevjo, skozi katero se pomika skupina togih teles, ki povzročajo gibanje zraka, ki ga ponazorimo s hitrostjo gibanja zraka, ki je posledica predvsem:

- zaradi tlačne, višinske in temperaturne razlike med vstopnim in izstopnim portalom predorske cevi
- zaradi gibanja vozil, kjer se del energije porablja za premagovanje kotalnega trenja drugi del pa za premagovanje zračnega upora, oz. za gibanje zraka (batni učinek)
- zaradi delovanja ventilatorjev.

Pri izdelavi modela so bile uporabljene določene predpostavke:

- vsi avtomobilski motorji so ogreti na delovno temperaturo, tako da katalizatorji lahko opravljajo svojo funkcijo v celoti.
- če je na koncu predora morebitna hitrost vetra, usmerjenega proti izstopu iz predora, nižja od hitrosti iz predora izstopajočega zraka, se jo upošteva kot povišanje tlaka zraka.
- izračuni so bili zvedeni s povprečnim koeficientom zračnega upora in s povprečno velikostjo čelnih površin vozil
- prav tako je bil upoštevan povečan koeficient zračnega upora v zaprtem prostoru ter njegovo zmanjšanje zaradi vožnje v koloni.

Malo bolj poglobljen razmislek nam pove, da se pri analizi prezračevalnih dogajanj v predorih dejansko srečamo s prostorskimi oz. trirazsežnimi tokovi zraka v predorih. To pomeni, da je treba reševanje nalog in problemov reševati s tridimenzionalno oz. prostorsko analizo. Ker je

pretakanje stisljivega fluida definirano z nelinearnimi parcialnimi diferencialnimi enačbami, težko dobimo eksaktne in enolične analitične rešitve za poljubne robne pogoje, razen v posebnih primerih, kjer se enačbe lahko zelo poenostavijo. Mnogokrat v inženirskih računskih ocenah uporabljamo aproksimacijske metode ob določeni stopnji zanesljivosti. Tudi ti načini so bili v pričujočem delu deloma raziskani.

V več primerih lahko probleme pri pretakanju fluidov (zraka) dovolj točno rešimo z uporabo enodimenzijske analize, katere osnova je predpostavka, da so vse veličine toka funkcija odvisne samo od ene koordinate, in sicer koordinate v smeri pretakanja fluida. To je zlasti primerno za proučevanje tokov v ceveh s konstantnim prečnim prerezum. V tem primeru variirajo veličine toka po prečnem prerezu. Enodimenzijska analiza pa zanemara te spremembe in zasleduje samo povprečne vrednosti parametrov v vzdolžnem prerezu, tako da je dobljeni rezultat omejen le na ugotavljanje povprečnih vrednosti.

Enodimenzijsko analizo lahko z dovolj veliko natančnostjo uporabimo pri tokovih, če so izpolnjeni naslednji pogoji:

- relativna sprememba prečnega prereza glede na dolžino toka je majhna, ko je $dD/dx \ll 1$, kjer je D značilna dimenzija toka
- polmer krivine osi toka je veliko večji od širine toka
- porazdelitev parametrov toka po prečnem prerezu se zelo malo spreminja.

Velika večina problemov izpolnjuje zahtevane pogoje, ki so določeni v regulativi, ki pokriva to področje. Strogo vzeto, takšni tokovi niso enodimenzijski, vendar jih lahko rešujemo s pomočjo enodimenzijske analize, zato jih imenujemo kvazi-enodimenzijski ali kvazi-paralelni tokovi.

V idealiziranem primeru obravnavamo idealno pretakanje v izolirani cevi, brez upoštevanja trenja v fluidu, prenosa toplote in mehanskega dela. To je izentropno pretakanje fluida, katerega veličine se spreminjajo samo zaradi spremembe prečnega prereza toka.

Pri realnem pretakanju se pojavi notranje trenje, ki lahko v primeru spremembe tlaka močno vpliva na karakteristiko toka. Zaradi poenostavitve obravnavamo enodimenzijsko pretakanje s trenjem v cevi s konstantnim prečnim prerezum. Takšno pretakanje je v praksi zelo pogosto (plinovodi, parovodi, motorji z notranjim zgorevanjem, cestni in železniški predori, itd.).

Izkazalo se je, da je kompleksnost razumevanja dinamike požara v predoru velika in da so enostavni matematični modeli, s katerimi se je skušalo rešiti problem prezračevanja v primeru požara, nezadostno natančni. Hiter razvoj računalniških tehnologij pa danes omogoča, da se zahtevni matematični modeli rešujejo na lahko dostopnih osebnih računalnikih. Tu omenjamo

predvsem modele, ki temeljijo na računski dinamiki fluidov. Pri tem ima največjo vlogo zahtevnost modela ter velikost izbrane geometrije. Kolikor je mogoče je potrebno geometrijo prilagoditi maksimalno dovoljenemu številu računskih točk, ki ga omejuje kapaciteta računalnika. (Petelin, 2005)

4.2 SHEMA MODELA

Matematični model je izdelan kot originalno univerzalno orodje za analizo prezračevanja v predoru. Z njim prikazujemo medsebojne odvisnosti opazovanih parametrov na koncu predora.

Vozeča vozila povzročajo gibanje zraka, stoječa ali v nasprotni smeri vozeča, to gibanje zavirajo. Razlika zračnih tlakov na obeh portalih (na vstopu in na izstopu) gibanje bodisi pospešuje, bodisi zavira. Tako je časovno spremenljiva hitrost zraka razen od časa, odvisna od:

- trenja in tlačne razlike zraka v predoru med portali
- števila stoječih vozil v predoru
- števila in smeri vožnje gibajočih se vozil
- hidrodinamičnih lastnosti vozil
- strukture prometa
- hitrosti vožnje.

4.3 NORMALNO PREZRAČEVANJE

Poudarek je na emisijah in s tem v zvezi na koncentracijah škodljivih snovi, ki jih povzročajo izpusti vozil, ki so udeležena v prometu. Upoštevan je normalen batni efekt v odvisnosti od hitrosti in vrste vozil, mehansko (prisilno) prezračevanje in veter. Upoštevane so tudi trenutne razmere (promet in ostale razmere v času 0), vendar pa program omogoča zasledovanje razmer tudi v daljšem časovnem obdobju (npr. v času od 0 do 1 ure). Upoštevani sta tudi zunanja temperatura in tlačne razmere zraka ob portalih.

4.4 POŽARNO PREZRAČEVANJE

Simulacija požara s pomočjo navedenega računalniškega programa (IDA RTV (2017)) omogoča določitev možnosti preprečevanja povratnega gibanja zraka, tj. preprečevanje, da bi dim dosegel vozila, ki so obtičala za mestom požara, gledano v smeri vožnje. Tu računamo porazdelitev temperature vzdolž predora, ki bi lahko povzročila uničenje ventilatorjev in ostale opreme. Prenos toplote med zrakom in steno predora je modeliran s pomočjo konvekcije in s

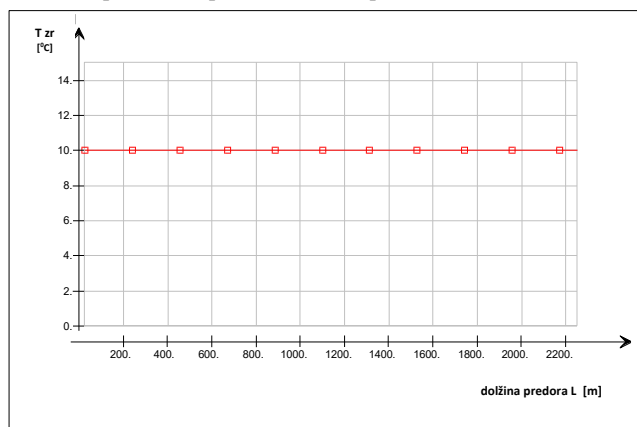
Batni efekt je računan po enačbi:

$$p_b = \frac{\rho}{2} \frac{c_{tk} \cdot A_v}{A_p \cdot \left(1 - \frac{A_v}{A_p}\right)^2} (v_v - u_z) \quad (33)$$

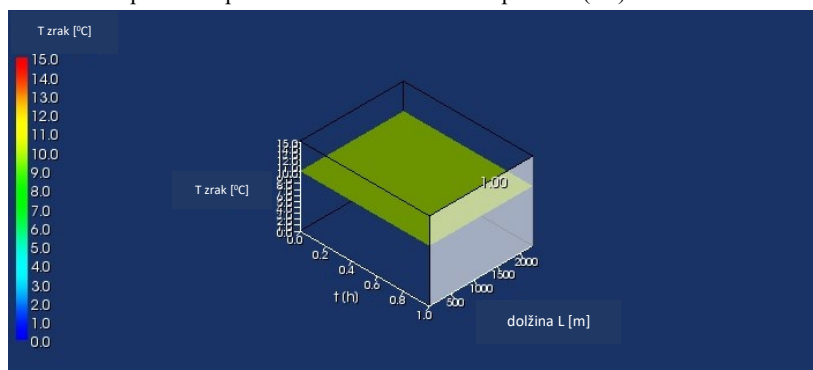
p_b	tlak zraka, povzročen z batnim Pa efektom	
ρ	gostota zraka	kg/m^3
c_{tk}	torni koeficient vozila	
A_P	prerez predora	m^2
A_v	čelna površina vozila	m^2
v_v	hitrost vozila	m/s
u_z	hitrost zraka	m/s

Rezultate lahko prikažemo v tabelah in diagramih, lahko poleg 1D, 2D, tudi v 3D diagramih:

Graf 3: Prikaz poteka temperature zraka v predoru v odvisnosti od dolžine predora



Graf 4: potek temperature zraka v 3D obliki v predoru (°C)



V nadaljevanju podajamo opise in rezultate izvedenih simulacij prezračevanja cestnega predora Kastelec na Primorski avtocesti za različne scenarije gašenja požarov. To je prikaz praktičnega primera uporabe navedenih teoretičnih predpostavk in rezultatov numeričnih simulacij, apliciranih na inženirsko delo pri načrtovanju in obratovanju zadevnega cestnega predora. Zanj so značilne posebne razmere v primerih učinkovanja močne burje, kot sunkovitega in smerno spremenljivega vetra, pri morebitnem pojavu požarov različnih moči in razsežnosti.

4.4.1 IZBIRA CFD PROGRAMA ZA SIMULACIJE

Računalniških programov za analizo dinamike fluidov v predoru je na voljo kar veliko, a večinoma gre za komercialne programe, s katerimi je možno simulirati večino inženirskih problemov vezanih na obnašanje fluidov. Po navadi so prosto dostopni, z možnostjo izvajanja 1D simulacij. Specialni programi z možnostjo 3D simulacij pa zahtevajo nakup licence z določeno časovno omejitvijo, oz. so prosto dostopni samo za določen segment analize.

Za program IDA RTV 3.0 (2017) sem se odločil zato, ker že v osnovi analize upošteva mednarodne predpise RVS in PIARC. Različka je bila v času mojega izvajanja simulacij med

vsemi najbolj posodobljena z zadostno funkcionalnostjo za pokrivanje celotnega obsega nalog načrtovanja prezračevanja cestnih predorov. Za program sem se odločil tudi zato, ker sem lahko za čas treh mesecev v rabo dobil originalni program.

Preglednica 3: primerjava CFD programov pred izvedbo simulacij v aprilu 2020

Programsko orodje CFD	IDA RTV 3.0	NIST FDS	ANSYS - Fluent 18.0**
Država nastanka	(1995) 2017* Švedska	(2000) 2013* ZDA, Finska	2016 ZDA
1D, 2D	√	√	√
3D	√	√	√
Podatki - lastni vnosi	√	√	√
časovna simulacija	√	√	√
zračni tlak	√	√	√
pretok	√	√	√
koncentracija onesnaženja	√	√	√
vzdolžno prezračevanje	√	√	√
prečno prezračevanje	√	√	√
enosmerni večpasovni promet	√	√	√
dvosmerni večpasovni promet	√	√	√
statični model	√	√	√
dinamični model	√	√	√
portalni veter	√	√	√
Promet	√	√	√
emisije	√	√	√
koeficient upora	√		
koeficient trenja	√		
difuzija	√		
konvekcija	√		
RVS, PIARC zahteve	√	---	---
upoštevanje realnega časa dogajanja	√	√	√
pretvorba drugih podatkov	SES, RUN		
zbirka HVAC komponent	√	√	√
80 kontrolnih mehanizmov	√		
Kritična hitrost	√	√	√
Požar	√	√	√
CO, NO ₂ , dim, tlak	√	√	√
Napoved smeri zračnega toka	√	√	√
turbulence, vrtinci	√	√	√
temperatura stene	√	√	√
enačbe	Kontinuitetna Bernoulli	Navier Stokes	
Izvoz datotek	PDF, DWG, CAD, word, excell		CAD
primerjava		Ne upošteva realnega profila predora	Boljši od NIST FDS
	Specialni program	Komercialni program	Komercialni program
	Nakup licence	odprtokodni	free students software

* posodobitev

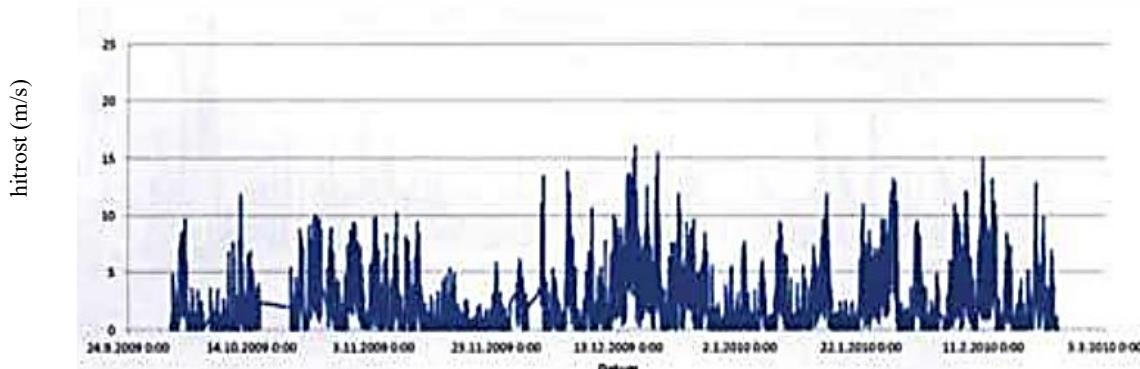
** združitev 2006

5. PROMETNE IN PREZRAČEVALNE RAZMERE OKROG PREDORA KASTELEC IN V NJEGOVI NOTRANJOSTI

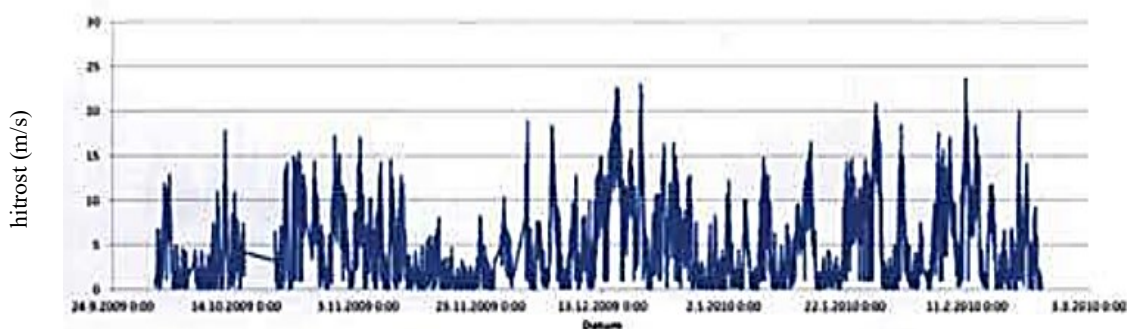
5.1 BURJA IN PREDOR KASTELEC

Na ARSO smo dobili merilne podatke o burji za nekaj različnih krajev v različnih časih, zanimivih tudi za predore. Iz podatkov je moč ugotoviti, da je burja sunkovit, nestalen veter, pravo nasprotje npr. Košavi (Srbija), ki piha konstantno daljše časovno obdobje, npr. čas zime. Za burjo je značilno, da so bili časovni intervali razmeroma dolgi, pa tudi po času trajanja med seboj zelo različni. V posameznih časovnih intervalih so bile merjene samo maksimalne in minimalne vrednosti hitrosti burje. Ker pa so spremembe hitrosti in smeri burje zelo hitre in naključne, smo posamezne časovne intervale razdelili na krajše intervale, med maksimumom in med minimumom pa smo s pomočjo statistične metode izbirali naključne vrednosti.

Tako je na *Slikah 15* in *16* prikazan 30 minutni interval, razdeljen na pod intervale z različnim trajanjem. V posameznih časovnih točkah so naključno izračunane hitrosti burje, med minimalno vrednostjo 19,74 m/s (71 km/h) in maksimalno 35,94 m/s (129,40 km/h). Delež tega vetra je 8% letno.



Slika 15: Hitrost vetra, september - marec 2010, Kastelec, vzhodna cev, izhod, (Vir: ARSO, 2010)



Slika 16: Sunki vetra, september - marec 2010, Kastelec, vzhodna cev, izhod, (Vir: ARSO, 2010)

Potek računskega postopka podajamo v nadaljevanju.

Najprej smo računali srednjo vrednost in standardno deviacijo za celoten interval, potem pa še za posamezne 6 minutne podintervale pri največji hitrosti burje 130 km/h.

Standardna deviacija je mera za disperzijo hitrosti okrog srednje vrednosti hitrosti zraka. Tako je:

$$U_{sr} = \frac{\sum_1^n u_i}{n} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (34)$$

Pri tem pomeni v enačbah 34 do 35:

u	hitrost zraka	[km/h]
u_{sr}	srednja hitrost zraka	[km/h]
n	število upoštevanih točk	
σ	standardna deviacija	

Zaradi možne velike disperzije, ki je posledica velike naključnosti, smo računali v različnih časovnih intervalih. Za celoten interval, torej 30 min dobimo:

$$U = u_{sr} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 27,50 \pm 0,97 \quad (35)$$

Ocenjujemo, da je primeren časovni interval, ki naj bi ga upoštevali, 6 minut.

Prezračevalni sistem predora naj v skladu s PIARC priporočili zajame 95 % dogodkov (v časovni skali). Ni potrebno, da projekt zajema 5% dogodkov ali pogojev obratovanja (advers condition) in tudi ni nujno potrebno, da bi cestni predor v teh redkih razmerah zapirali za promet. Zato se pojavi dilema, ali naj se strogo držimo okvira 5%, ali lahko odstopamo od te vrednosti z ozirom na to, da burja presega hitrost 130 km/h v obsegu 8%, tj. 3% več od dovoljenega odstopanja glede tveganja. (Modic, 2021)

Ob predpostavki, da zanemarimo 8% nevarnih dogodkov, ne samo 5%, to lahko storimo zaradi velike naključnosti burje, in njenih kratkotrajnih močnih sunkov. Ker je v PIARC priporočilih upoštevan razmeroma konstanten veter, nam ostane še 92% delež nevarnih dogodkov. Po podatkih je v teh primerih hitrost vetra večja od 44 km/h. Zaradi varnosti upoštevamo višjo hitrost burje od 44 km/h, kar pomeni, da je največja hitrost burje:

$$110 \cdot 0.92 = 100 \text{ km/h (28 m/s).}$$

Iz rezultatov izračuna vidimo, da so med posameznimi podintervali razlike, ki pa niso velike. Če bi izbrali kratek interval, bi se razlike najmanj podvojile. Razlike bi nastale tudi, če bi upoštevali drugačno naključno porazdelitev hitrosti zraka, saj se spreminjajo tudi trendi

oziroma gostota in redkost nastopa posameznih bodisi visokih bodisi nizkih vrednosti. Zato zelo kratki intervali ne dajejo pravih rezultatov.

Pri tem je treba opozoriti, da je zelo pomembno, kje merimo hitrost vetra. Ni vseeno, ali je to v oddaljenosti na primer 100 m od portala, ali tik pred portalom, pomembna je tudi oblika vstopnega koridorja do portala predora (npr. oblika Venturijeve cevi).

Na *Sliki 17* je prikazan koridor do izhodnega portala vzhodne cevi predora Kastelec, v katerega piha burja, in to v nasprotni smeri prometa. Iz slike se jasno vidi, da ima koridor obliko Venturijeve cevi, kjer se hitrost vetra pospešuje. Oblikovanje portala je torej z vidika prezračevanja predora, napačno. (Modic, 2021)



Slika 17: Izhodni portal predora Kastelec, leva cev (Vir: DARS, 2004)

Merilna postaja je nekoliko oddaljena od portalnega območja, ker je locirana na hribu nad predorom. S dodatnimi meritvami smo ugotovili, da je bila hitrost 1.0 m pred izhodnim portalom višja od hitrosti, izmerjene v merilni postaji. V samem predoru je bila še večja, ker je portal oblikovan tako, da se zmanjša prerez, po katerem piha veter, koridor v obliki Venturijeve cevi pa ta efekt povečanja hitrosti zraka še poveča. Problematična je tudi metodologija PIARC.

Za izračun hitrosti vetra je uporabljena Bernoullijeva enačba. Enačba sledi iz zakona o ohranitvi energije, pri čemer se upošteva kontinuitetna enačba. V praksi velja enačba vedno le približno, ker se zahteve po njeni veljavnosti medsebojno izključujejo: tok neviskoznih tekočin praviloma ni laminaren. Uporabi se jo lahko pri plinih, kadar je gostota plina približno konstantna. Velikokrat se uporabi tudi za opis turbulentnega toka, ki je v povprečju stacionaren.

Predlog (po PIARC - u) je:

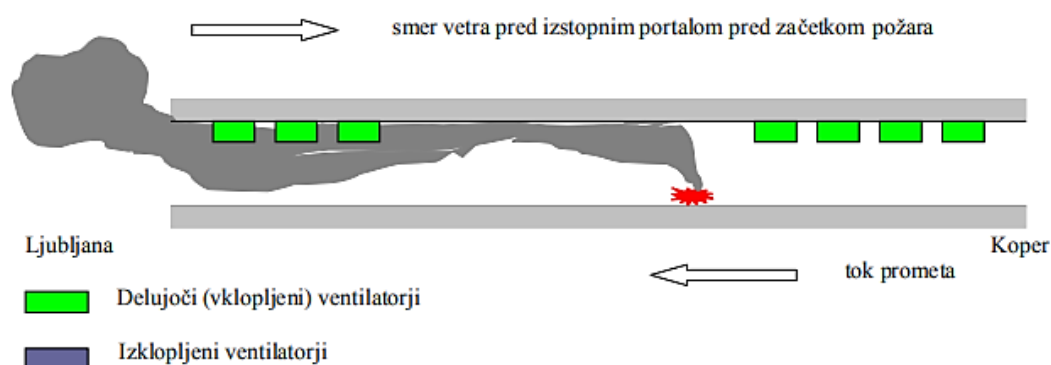
$$\Delta p = k \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (36)$$

Pri tem pomeni:

Δp	tlačna razlika med portaloma	[Pa]
K	stopenjski faktor	-
P	gostota zraka	[kg/m ³]
V	hitrost zraka	[km/h]

Pri tem je (po PIARC – u): $k = 0.70 \div 1.00$

Logika in izkušnje kažejo, da je faktor k v večini primerov 1.00, lahko pa je tudi večji, če je na primer na drugi strani predora podtlak, ali če je konfiguracija terena takšna, da to omogoča. Da je faktor k povečan, je bilo ugotovljeno tudi s pomočjo CFD simulacij.



Slika 18: Shema obratovanja ventilatorjev v smeri proti Ljubljani v primeru burje, (Vir: Petelin s sod., 2005)

V nadaljevanju podajamo nekatere splošno znane ugotovitve (Petelin & sodelavci, 2005)

V primeru požara je težavnejše ukrepanje v vzhodni cevi (smer Koper - Ljubljana). V primeru toka zraka med požarnim alarmom v smeri prometa bi morali biti ventilatorji vklopljeni glede na hitrost vetra in lokacijo požara, kot je prikazano na Slikah 21 in 18. Z zeleno barvo so označeni delujoči (vklopljeni) ventilatorji. Omenjeni scenariji lahko veljajo za hitrosti zraka v predorski cevi do največ 3 m/s v smeri prometa. Število delujočih ventilatorjev je odvisno od hitrosti zračnega toka na vstopu v predorsko cev, vendar samo v primeru, da na izstopnem portalu ni močnejšega vetra.

Razmere postanejo težavnejše v primeru zračnega toka v nasprotni smeri prometnega toka. Take razmere nastanejo predvsem ob pojavu močne burje. Med burjo se vzhodna cev prezračuje proti meteorološkemu tlaku. To pomeni, da je tudi v primeru redkega prometa med burjo potrebno vključiti prezračevalne ventilatorje, da bi se zadržala smer zračnega toka v smeri gibanja vozil, kar je pomembno predvsem v primeru, da imamo opravka s požarom. V izjemnih primerih, ko se pojavi hitrost vetra nad 30 m/s, je predviden izklop prisilnega prezračevanja, kar pomeni, da se bo predorska cev naravno prezračevala proti smeri prometa. V takih

meteoroloških razmerah ne bi mogli zadostiti požarnovarnostnim zahtevam, če bi prišlo do požara.

Dodatno težavo predstavlja spreminjanje smeri burje med normalnim delovanjem prezračevalnega sistema. V takem primeru bi morali predor zapreti, ker ventilatorji v primeru požara ne bi utegnili dovolj hitro slediti spremembam tlaka na portalih. Predor bi morali med normalnim obratovanjem praviloma zapreti tudi v primeru zelo močne burje (s hitrostmi nad 30 m/s). To bi se zgodilo, kadar bi v normalnih pogojih delovanja npr. 10 ventilatorjev delovalo in vzdrževalo smer zračnega toka v smeri gibanja vozil, pri tem pa bi hitrost zračnega toka padla na 0 m/s ali pa se celo obrnila in tveganje v primeru požara bi se dodatno povečalo. Na *Sliki 18* je prikazan način prezračevanja v primeru požara v vzhodni predorski cevi (smer Koper - Ljubljana) s tokom zraka na vzhodnem (izstopnem) portalu hitrosti nad 3 m/s v smeri nasproti prometa. Zeleno so označeni delujoči ventilatorji. V primeru požara je potrebno omogočiti ročno krmiljenje ventilatorjev iz glavne pogonske centrale in z lokalnih krmilnih polj. Ukazi, ki se prenašajo na posamezno predorsko cev, so ukazi za smer prezračevanja za vsak vzdolžni ventilator ter vklop in izklop vsakega vzdolžnega ventilatorja.

Zahteve z vidika požarne varnosti se nanašajo na požarno odpornost elementov predora, ki morajo zdržati vsaj 90 minut (armiranobetonska konstrukcija REI 90, kanali za kable EI 90, vrata EICS 90). Dodatne zahteve vključujejo požarno prezračevanje, ki mora v primeru požara omogočiti varen umik ter učinkovito intervencijo z odvajanjem dima in toplote. Ker je promet v teh predorih ob rednem delovanju enosmeren, se kot primerni sistemi prezračevanja uporabljajo impulzni ventilatorji. Ventilatorji morajo imeti temperaturno odpornost do 400°C.

Za vse predore je značilno, da so v njih emisije dimnih plinov, nastalih v motorjih z notranjim zgorevanjem, skoncentrirane, kar pomeni, da tako v cevi kot na izstopu iz cevi velikokrat zelo presegajo mejne in dopustne vrednosti, kar je še posebej problematično, če je v bližini večje naselje.

Za krmiljenje prezračevanja je uporabljen *programabilen logični krmilnik* (PLC). V uporabi so trije različni načini krmiljenja prezračevanja:

1. avtomatsko obratovanje,
2. obratovanje v primeru požara
3. ročno upravljanje.

Sistem krmiljenja je projektiran tako, da so ti načini obratovanja neodvisni drug od drugega in da se jih da ločeno izbirati za vsako predorsko cev. PLC za prezračevanje se projektira za obdelavo podatkov o koncentraciji CO, koncentraciji prašnih delcev (vidljivosti), smeri in hitrosti zraka v predoru, za primerjavo teh vrednosti z vnaprej določenimi mejnimi vrednostmi

in za vklop in izklop vzdolžnih ventilatorjev, ko so temeljne vrednosti prekoračene, oziroma so vrednosti manjše od mejnih vrednosti.

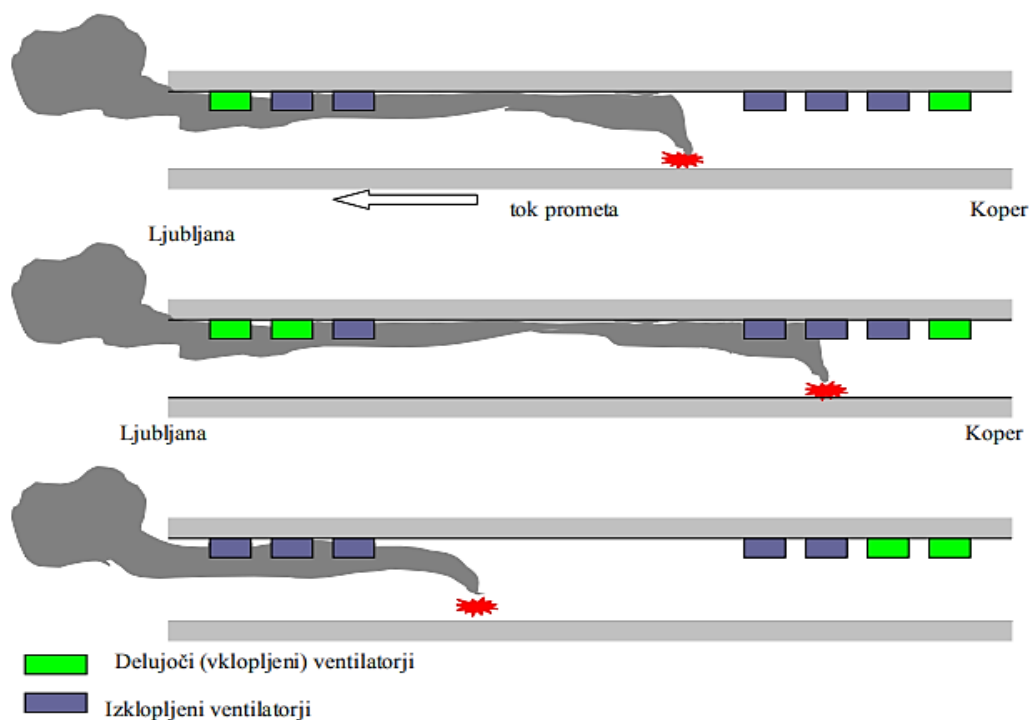


Slika 19: Emisije dimnih plinov iz predora Markovec in njihov vpliv na naselja, (Vir: Načrt ZIR, 2015)



Slika 20: Vzdolžno prezračevanje v predoru, (Vir: Suban in sod., 2016)

Pri avtomatskem načinu delovanja je izmerjena kakovost zraka vhodna vrednost v sistemu krmiljenja. Iz vsake predorske cevi sta na voljo dve vrednosti za koncentracijo prašnih delcev, kot tudi za smer in hitrost gibanja zraka. Odčitane vrednosti koncentracije CO iz vsake predorske cevi so med seboj primerjane, za vhodno vrednost v PLC pa se uporabi samo višjo odčitano vrednost. Podobno se uporabi višje izmed odčitanih vrednosti ekstinkcije kot vhodno vrednost v sistem krmiljenja prezračevanja.



Slika 21: Shema obratovanja ventilatorjev v smeri Koper - Ljubljana, (Vir: raziskovalna naloga MO RS, 2005)

Ko so prisotne zelo majhne koncentracije CO in je vidljivost dobra, se prezračevanje ne vklopi. Če se koncentracija CO poveča na 30 ppm, oziroma če se koeficient ekstinkcije zviša nad $0,0025 \text{ m}^{-1}$ in katerikoli od obeh pogojev traja pet minut, potem mora prilagojeno obratovati vsaj en par ventilatorjev vsaj pet minut. Če se koncentracija CO ali koeficient ekstinkcije še naprej zvišujeta, se po obdobju čakanja v trajanju petih minut ventilatorji vklopljajo postopno.

V primeru, da bi koncentracija CO ali koncentracija prašnih delcev (zmanjšanje vidljivosti) ostalo nad največjo dovoljeno mejo (200 ppm CO; $0,014 \text{ m}^{-1}$ ekstinkcije) v trajanju desetih minut, ko vzdolžni ventilatorji delujejo z največjo zmogljivostjo, se mora prometna signalizacija v prizadeti cevi preklopiti na zaporo te cevi (»rdeči semafor«).

Pri zniževanju koncentracije CO, oz. koeficienta ekstinkcije se zaradi histereze elementa za nadziranje zraka ventilatorjev ne izkloplja pri enakih vrednostih, kot se jih vkloplja. Izmerjene vrednosti morajo biti manjše od mejnih vrednosti v trajanju pet minut, preden se sistem ponovno preklopi nazaj na prejšnjo stopnjo.

V primeru požara ali vzdrževanja se lahko vzdolžne ventilatorje ročno krmili iz glavne pogske centrale in z lokalnih krmilnih polj, vgrajenih v ploščah za preklp z avtomatskega na ročno upravljanje v izrednih razmerah.

Cestni predor razdelimo na dva dela, in sicer primarni del obsega vstopni del predora do požara. Požar predstavlja zastojno točko. Tu vozila zaradi požara stojijo, zato moramo zagotoviti, da

se dim ne širi v smeri proti vhodu v predor, oz. nasprotni smeri vožnje. Stran za požarom pa je sekundarni del, oz. v tej smeri se vozila lahko odpeljejo iz predora, se pa v tej smeri predor zaradi batnega efekta tudi odzračuje.

Predor Kastelec (tudi Markovec in Dekani) ima glede na lego v prostoru to posebnost, da je najpogostejši in najmočnejši veter z vzhoda burja, ki piha vzporedno, tj. direktno v vzhodno cev predora, v nasprotni smeri prometa, kar pogosto zaradi svojih sunkov povzroči tudi ustavitev prometa, predvsem zaradi varnostnih razlogov.

Na začetku smo omenili, da morajo biti predori načrtovani tako, da že samo gibanje vozil povzroči, da se predor odzračuje v smeri vožnje (batni efekt).

Za vzhodno cev predora Kastelec, katere naklon je v smeri proti Ljubljani pozitiven, kar pomeni, da se predorska cev dviga, je neugodno v primeru burje to, da ta dimne pline potiska nazaj in navzdol, kar pomeni negativno smer vetra.



Slika 22: Burja zaprla predor Kastelec, (Vir; foto arhiv DARS, 27.11.2015)

Vzhodna cev predora se prezračuje vzdolžno. Z vgradnjo kar 7 parov impulznih ventilatorjev, ki so nameščeni približno na 100 metrski medsebojni razdalji (3 na vhodu, 4 ob izhodu) se premaguje moč vetra in s tem zagotavlja, da se povratni tok dima ne zgodi. S tem se zagotavlja čistost primarnega dela cevi predora. (*Slika 21*).

Različna mesta nastanka požara pomenijo tudi različne kombinacije delujočih in izklopljenih ventilatorjev.

Difuzija je proces, pri katerem nastane snovni tok s področja z višjo koncentracijo na področje nižje koncentracije. Izpušni plini in dim, ki nastane pri požaru v predoru so tudi difuzija, pri čemer pride do onesnaženja zraka, vode in zemlje.

6. ANALIZA DOBLJENIH REZULTATOV

6.1 NAPAKE PRI IZRAČUNIH PO ENAČBAH

Preglednica 4: Napake med rezultati izračunov pri moči požara 30 MW

Moč požara	tlak burje p	T	Dim ε	tok Q	enačbe 27, 28 ,30, 34					Ric/IDA	T _f /IDA	F _m /IDA	Ken/IDA
					V _{krit} (m/s)					napaka (%)			
MW	Pa	°C	l/m	m ³	Ric	T _f	F _m	Ken	IDA	Ric	T _f	F _m	Ken
30	100	159.17	34.40	144.5	2.220	2.188	2.219	2.321	2.208	0.54	-0.009	0.49	5.11
V _{zrak} močno pada	200*	204.10	45.75	-135.82	2.145	2.065	2.147	2.071	2.208	-2.81	-6.47	-2.76	-6.20
	300	106.29	23.11	-258.78	2.316	2.229	2.318	2.230	2.208	4.89	0.95	5.02	0.99
	400	81.63	17.17	-338.69	2.370	2.280	2.371	2.280	2.207	7.38	3.30	7.43	3.30
	500	69.37	14.20	-401.92	2.400	2.306	2.399	2.310	2.207	8.74	4.48	8.69	4.66
	600	61.73	12.34	-456.07	2.419	2.320	2.417	2.330	2.207	9.60	5.12	9.51	5.57
	700	56.41	11.05	-504.18	2.430	2.337	2.430	2.340	2.206	10.15	5.93	10.15	6.07
	800	52.44	10.09	-547.80	2.440	2.346	2.440	2.350	2.206	10.60	6.34	10.60	6.52
	900	49.33	9.33	-588.19	2.448	2.353	2.447	2.361	2.206	10.97	6.66	10.92	7.02
	1000	46.83	8.72	-625.67	2.455	2.359	2.454	2.367	2.206	11.28	6.93	11.24	7.29

Preglednica 5: Napake med rezultati izračunov pri moči požara 40 MW

Moč požara	tlak burje p	T	Dim ε	tok Q	enačbe 27, 28 ,30, 34					Ric/IDA	T _f /IDA	F _m /IDA	Ken/IDA
					V _{krit} (m/s)					napaka (%)			
MW	Pa	°C	l/m	m ³	Ric	T _f	F _m	Ken	IDA	Ric	T _f	F _m	Ken
40	100	215.06	47.06	141.0	2.340	2.31	2.34	2.260	2.371	-1.30	-2.57	-1.30	-4.68
V _{zrak} močno pada	200	270.86	60.02	-139.2	2.260	2.23	2.26	2.180	2.371	-4.68	-5.94	-4.68	-8.00
	300	141.09	30.94	-265.3	2.470	2.44	2.47	2.390	2.370	4.20	2.90	4.20	0.84
	400	107.70	23.07	-347.1	2.540	2.51	2.54	2.458	2.370	7.17	5.90	7.17	3.70
	500	90.95	19.10	-411.9	2.580	2.55	2.58	2.495	2.370	8.86	7.59	8.86	5.27
	600	80.48	16.60	-467.4	2.610	2.57	2.61	2.519	2.369	10.17	8.48	10.17	6.33
	700	73.18	14.86	-516.7	2.628	2.59	2.63	2.537	2.369	10.93	9.32	11.01	7.09
	800	67.74	13.56	-561.4	2.640	2.60	2.64	2.551	2.369	11.43	9.75	11.43	7.68
	900	63.47	12.54	-602.8	2.650	2.61	2.65	2.561	2.368	11.90	10.12	11.90	8.15
	1000	60.02	11.72	-641.3	2.660	2.62	2.66	2.570	2.368	12.33	10.64	12.33	8.53

Preglednica 6: Napake med rezultati izračunov pri moči požara 100 MW

Moč požara	tlak burje p	T	Dim ε	tok Q	enačbe 27, 28 ,30, 34					Ric/IDA	T _f /IDA	F _m /IDA	Ken/IDA
					V _{krit} (m/s)					napaka (%)			
MW	Pa	°C	l/m	m ³	Ric	T _f	F _m	Ken	IDA	Ric	T _f	F _m	Ken
100	100	586.31	133.00	124.9	2.630	2.60	2.630	2.543	2.884	-8.80	-9.80	-8.80	-11.82
V _{zrak} močno pada	200	712.65	153.00	-157.5	2.516	2.48	2.519	2.429	2.884	-12.76	-14.00	-12.65	-15.77
	300	367.59	81.12	-312.5	2.905	2.86	2.908	2.805	2.883	0.76	-0.97	0.87	-2.70
	400	277.92	60.95	-409.0	3.055	3.02	3.058	2.949	2.883	5.96	4.75	6.07	2.28
	500	225.84	50.48	-482.0	3.158	3.11	3.161	3.049	2.883	9.53	7.87	9.64	5.75
	600	202.72	43.83	-544.3	3.208	3.16	3.211	3.097	2.883	11.27	9.60	11.37	7.42
	700	182.38	39.18	-597.5	3.255	3.21	3.258	3.143	2.882	12.94	11.38	13.04	9.05
	800	167.11	35.69	-645.8	3.290	3.24	3.296	3.179	2.882	14.15	12.42	14.36	10.30
	900	155.14	32.95	-689.7	3.320	3.27	3.326	3.208	2.882	15.19	13.46	15.40	11.31
	1000	145.47	30.73	-730.3	3.349	3.30	3.352	3.232	2.881	16.24	14.54	16.34	12.18

Preglednica 7: Napake med rezultati izračunov pri moči požara 300 MW

Moč požara	tlak burje p	T	Dim ε	tok Q	enačbe 27, 28 ,30, 34					Ric/IDA	T _f /IDA	F _m /IDA	Ken/IDA
					V _{krit} (m/s)					napaka (%)			
MW	Pa	°C	l/m	m ³	Ric	T _f	F _m	Ken	IDA	Ric	T _f	F _m	Ken
300	100	1624.08	368.0	101.7	2.918	2.88	2.921	2.817	3.268	-10.70	-11.87	-10.60	-13.80
V _{zrak} močno pada	200	1679.38	368.5	-144.3	2.890	2.85	2.890	2.790	3.237	-10.71	-11.95	-10.71	-13.80
	300	1317.46	299.2	-346.3	3.094	3.05	3.097	2.987	3.390	-8.73	-10.02	-4.32	-11.88
	400	980.85	221.9	-495.6	3.350	3.30	3.350	3.234	3.390	-1.17	-2.65	-1.17	-4.60
	500	810.42	182.2	-611.5	3.510	3.47	3.520	3.395	3.390	3.53	2.35	3.83	0.14
	600	702.97	157.2	-706.2	3.640	3.59	3.640	3.516	3.389	7.40	5.93	7.40	3.74
	700	627.51	139.6	-786.0	3.740	3.69	3.740	3.611	3.389	10.35	8.88	10.35	6.55
	800	570.89	126.4	-855.3	3.820	3.77	3.820	3.690	3.389	12.71	11.24	12.71	8.88
	900	536.32	116.1	-917.2	3.870	3.82	3.880	3.742	3.389	14.19	12.71	14.48	10.41
	1000	490.07	107.7	-973.5	3.950	3.90	3.950	3.816	3.389	16.55	15.07	16.55	12.59

Pri tem pomeni:

- Padec tlaka zaradi požara (Pa/1MW = 0.01): pri 200 Pa, so za *T*, *dim*, *Q* višje vrednosti, pri 300 MW *V_{zrak}* raste počasneje,
- Padec tlaka zaradi požara (Pa/1MW = 0.01): pri 300 Pa, so za *T*, *dim*, *Q* opazno nižje vrednosti;
- *V_{zrak}*: na vsakih 100 Pa se vrednost poveča za ~ 1m/s, *T* pada, *V_{krit}* ~ konst., *Q* se veča (5-10 x) glede na moč požara;
- *V_{zrak}*: pri 300 Pa se po padanju začne dvigati, raste približno 1m/s na vsakih dodatnih 100 Pa;
- *V_{krit}*: se pri določeni moči požara, pri vrednosti Pa/1MW=0,01 ne spreminja, ne glede na *p*, *T*, *Q*, *V_{zrak}*, (IDA RTV, 2017), kar smo ugotovili že iz preglednice 3, Graf 4

V Preglednicah 4 do 7 je možna primerjava napak, računanih po enačbah 27, 28, 30 in 34, z vrednostmi simulacij, dobljenih s programom IDA RTV (2017), pri različnih močeh požara. V hipotezi postavljena trditev glede določanja kritične hitrosti zraka v predoru s Kennedyjevo enačbo lahko pritrdilno navedemo, da je dovolj zanesljiva in uporabna. Celovita razlaga je podana v nadaljevanju, kjer primerjamo dobljene rezultate izračunov:

Ugotovili smo, da je pri določanju kritične hitrosti zraka v predorski cevi pomembno naslednje:

- temperatura zraka T pada s povečanjem tlaka p , ki ga ustvari veter in s tem se poveča količina zraka Q
- kritična hitrost zraka v_{krit} je razmeroma konstantna, ne glede na moč požara, oz. je vseskozi nad določeno kritično mejo 1,5 m/s
- pretok zraka Q se pri vseh računskih močeh požara močno povečuje od vrednosti tlaka burje 300 Pa naprej
- pri tlaku burje 200 Pa, temperatura T in količina dima ε močno narasteta, pretoku zraka Q se spremeni smer (primarni del predora), oz. predznak, količina pri šibkejših požarih (do 50 MW) ostane skoraj enaka
- pri požaru z močjo 300 MW hitrost zraka raste počasneje
- hitrost zraka pri tlaku burje 200 Pa v vseh navedenih primerih računskih močeh požara (30, 40, 100 in 300 MW) močno pade
- pri tlakih burje p , večjih od 300 Pa, je opaziti zniževanje temperature T in količine dima ε ter večanje pretoka zraka Q , glede na tlak burje 200 Pa
- hitrost zraka v_{zrak} se pri tlaku burje 300 Pa zopet dvigne in narašča približno 1m/s pri vsakih dodatnih 100 Pa tlaka burje
- kritična hitrost v_{krit} pri določeni moči požara, se pri vrednosti Pa/1 MW = 0.0 ne spreminja, ne glede na tlak p , temperaturo T , pretok zraka Q in hitrost zraka v_{zrak}
- ko se smer pretoka Q zamenja, se začne dim širiti v primarni predel predora.

V primeru, da piha burja z izhodne strani predora pa pomeni, da:

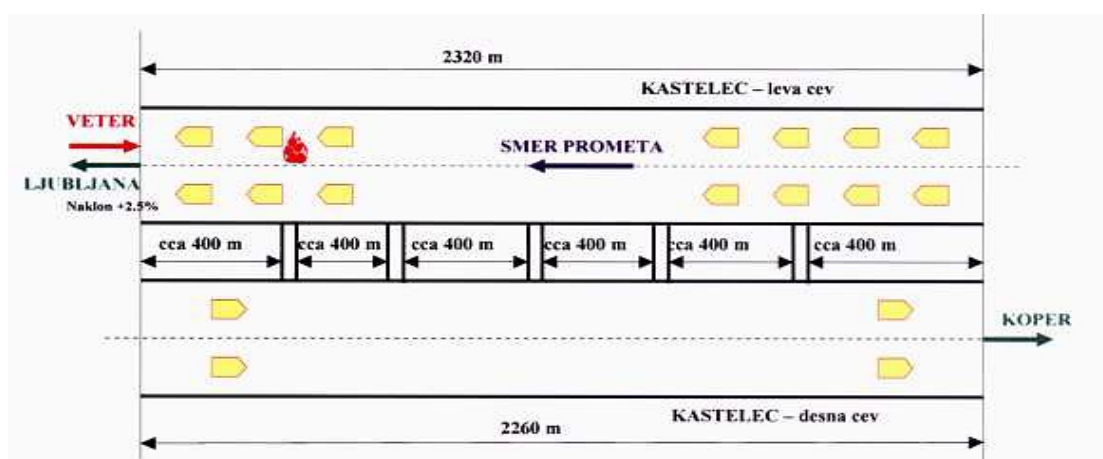
- se z nižanjem tlakov burje pri istih pogojih, vrednost kritične hitrosti približuje $v_{krit} = 1,5\text{m/s}$
- je količina dima ε pri v_{krit} , ne glede na tlak, moč in Pa/1 MW, približno enaka
- je vstopno - izstopni pretok zraka Q pri v_{krit} približno enak, ne glede na tlak, moč, ipd.
- se pri istem tlaku burje, s skrajšanjem dolžine požara poveča samo temperatura požara T
- se pretok Q ne poveča z daljšanjem dolžine požara pri istem tlaku burje
- ima pretok Q nasproti smeri gibanja negativni predznak (-)
- je hitrost zraka v_{zrak} nasprotna smeri gibanja vozil
- se pri istih veličinah, večji dolžini požara, nižji temperaturi, količina dima ε poveča
- se s povečevanjem padca tlaka zaradi požara Pa/1MW, v_{krit} znižuje. Če je ta vrednost manjša (med 0,1 in 10,0), je v_{krit} okoli 2,2 m/s, poveča pa se zračni tok Q
- je od $p = 300$ Pa naprej temperatura požara $T_{požar}$ praktično nespremenjena
- je $v_{krit} = 2,206$ m/s, ki se ne spreminja glede na velikost tlaka, Pa/1MW, ipd.

6.2 ANALIZE IN SIMULACIJE S PROGRAMOM IDA RTV (2017)

Obstaja vrsta računalniških programov, tako univerzalnih kakor tudi specialnih, za dimenzioniranje prezračevalnih razmer v predorih. Nekateri programi omogočajo le dimenzioniranje posameznih segmentov, kot npr. samo prezračevanje, ali samo simulacije požara, ali samo požarno ogroženost. Nekateri pa omogočajo analizo celovitega reševanja problemov v predoru, kot npr. skupek prezračevanja vseh osnovnih tipov prezračevanja (naravno, prisilno, vzdolžno, polprečno, prečno, požarno), vključno z analizo vseh parametrov, pomembnih pri nastanku in širjenju požara v predoru. V nadaljevanju podajamo nekatere splošno znane ugotovitve (Modic, 2021)

Uradni naziv programa uporabljenega programa je IDA Road Tunnel Ventilation, verzija 3.0, izdelan v EQUA Simulation, Group na Švedskem, leta 2017.

Program omogoča analizo zračnih tokov v cestnem predoru v povezavi z emisijo vozil, rezultat tega je izračun koncentracij posameznih zdravju škodljivih in strupenih plinov ter drugih sestavin (CO, NO_x, dim in saje) v predoru. Proučujemo lahko tako normalno-higiensko kakor tudi požarno prezračevanje. Proučujemo lahko vzdolžno, polprečno in prečno prezračevanje, z možnostjo enosmernega ali dvosmernega prometa. Omogočena je tudi študija dinamike prometa, tj. normalnih prometnih tokov, zgostitev in zastojev. Rezultati simulacije prikazujejo zračni tlak in temperature, pretok in količino zraka, ter koncentracije škodljivih snovi vzdolž predorske cevi. Vhodni podatki so geometrija predora, vključno s trenjem pri pretoku zraka, gostota in razmerje vozil v prometu, kakovost oziroma emisija vozil, ter hidrometeorološki podatki na lokaciji, kjer je predor umeščen v prostor.



Slika 23: Skica tlorisa predora Kastelec z bistvenimi podatki o prečnikih in ventilatorjih, (Vir: Modic, 2021)

6.2.1 SCENARIJI

Pri analizi podatkov, dobljenih z računalniško simulacijo dogajanj v vzhodni cevi predora Kastelec, so bili upoštevani različni scenariji, in sicer:

1) analiza razmer v predoru z in brez burje, brez požara:

Scenarij 1: Požara ni, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 200 Pa

Scenarij 2: Požara ni, izključeni so vsi ventilatorji, moč burje 200 Pa

Scenarij 3: Požara ni, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje 500 Pa

2) analiza razmer v predoru z in brez burje, požar:

Scenarij 1: Požar ima moč 30 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje 0 Pa

Scenarij 2: Požar ima moč 30 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje 100 Pa

3) analiza razmer v predoru z burjo in s požarom (različne moči in različne hitrosti):

Scenarij 1: Požar ima moč 30 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 500 Pa

Scenarij 2: Požar ima moč 30 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 500 Pa

Scenarij 3: Požar ima moč 30 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 320 Pa

Scenarij 4: Požar ima moč 40 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 500 Pa

Scenarij 5: Požar ima moč 40 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 400 Pa

Scenarij 6: Požar ima moč 40 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 300 Pa

Scenarij 7: Požar ima moč 40 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 250 Pa

Scenarij 8: Požar ima moč 40 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 410 Pa.

Pri tem smo opazovali vrednosti CO₂, NO₂, vidljivosti (koncentracijo dima), kritično hitrost zraka, ipd. Dobljene podatke smo obdelali računsko, in sicer smo uporabili 4 različne enačbe in na koncu primerjali izračune ter dobljene vrednosti, izračunali napake (ki se gibljejo okoli 5%), ipd., kar je skladno z navodili, oz. zakonodajo.

Največjo pozornost smo namenili dogajanju v predoru, ko z vzhodne strani vanj piha burja.

6.2.1.1 ANALIZA RAZMER OB NORMALNI VOŽNJI BREZ POŽARA

Analiza razmer je bila izvedena za vzhodno cev predora Kastelec, smer Koper - Ljubljana. Predor je dvocevni s po dvema voznima pasovoma, vzhodna cev dolžine $L = 2278$ m. Promet je *tekoč* (*moving*, IDA RTV), hitrost vozil je 100 km/h. Požara ni, obdelane so bile različne hitrosti vetra. Hitrost vetra je izražena s tlakom zraka v Pa.

Preglednica 8: Analiza razmer v vzhodni predorski cevi pri različnih tlakih vetra - burje, brez požara

prezračevanje	enota	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno
hitrost vozil	km/h	100	100	100	100	100	100	100
tlak burje	Pa	0	100	200	200	300	400	500
št. ventilatorjev	n	14	14	14	0	14	14	14
V_{vent}	m/s	30	30	30	0	30	30	30
Jet fans*	kW	486.3	486.3	486.3	0.0	487.0	487.0	487.0
potisk _{vent}	N/kW	30	30	30	0	30	30	30
T_{zrak}	°C	10	10	10	10	10	10	10
T_{stena}	°C	10	10	10	10	10	10	10
P ₁ vhodni portal	Pa	0	0	0	0	0	0	0
P ₂ izhodni portal	Pa	0	100	200	200	300	400	500
Smer zraka**		V+BE-B	V+BE-B	V+BE-B	V+BE-B	V+BE-B	V+BE-B	V+BE-B
P _{levo} (=Atm)	Pa	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45
P _{desno} (=Atm)	Pa	-57.45	42.5	142.55	142.55	242.5	342.5	442.5
Moč požara	MW	0	0	0	0	0	0	0
V_{zrak} vhod (batni efekt)	m/s	8.605	7.716	6.578	4.887	5.712	4.547	3.204
V_{zrak} izhod (ignoriramo)	m/s	-8.602	-7.707	-6.744	-4.876	-5.694	-4.528	-3.188
V_{krit}	m/s	0	0	0	0	0	0	0
Q _{levo}	m ³ /s	490.6	440	385.3	278.6	325.6	259.2	182.6
Q _{desno}	m ³ /s	-490.4	-439.3	-384.4	-278.0	-324.6	-258.2	-181.8
Smer levo-desno	kapaciteta do 4650 vozil, gostota prometa 6.8/km/vozni pas							
sestava prometa***	1000 os, 200 tv, 40 tc							

Kjer je:

- * ventilatorji so nameščeni na naslednjih razdaljah: 50 m, 150 m, 250 m, 350 m, 2122 m, 2178 m, 2228 m
- ** smer, gibanja zraka (ventilatorji + batni efekt - burja)
- *** os-osebna vozila, tv-tovorna vozila, tc-tovornjaki cisterne

Preglednica 9: Prikaz količin v vzhodni predorski cevi pri tekočem prometu, brez požara

Količine:	Pa	0	100	200	200	300	400	500
Na vrodu:								
Motnost toka dima	m ² /s	0	0	0	0	0	0	0
CO	mg/s	0	0	0	0	0	0	0
NO ₂	µg/s	0	0	0	0	0	0	0
Sektor:								
Motnost toka dima	m ² /s	1.443.10 ⁻⁴	1.054.10 ⁻⁴	1.204.10 ⁻⁴	1.6.10 ⁻⁴	1.426.10 ⁻⁴	1.794.10 ⁻⁴	2.548.10 ⁻⁴
CO	mg/s	0.7958	0.8882	1.015	1.404	1.202	1.512	2.147
NO ₂	µg/s	60.02	66.9	76.56	105.9	90.67	114	161.9
Na izhodu:								
Motnost toka dima	m ² /s	0.04683	0.04682	0.04682	0.04681	0.04683	0.04683	0.04683
CO	mg/s	394.7	394.6	394.6	394.5	394.6	394.6	394.6
NO ₂	µg/s	29769	29762	29762	29757	29767	29767	29767

Analiza zajema različne hitrosti vetra - burje, ki jo izrazimo s tlakom (od 0 - 500 Pa).

Veter - burja ima smer nasprotno gibanju vozil in s tem gibanju zraka v vzhodni predorski cevi (batni efekt). Na koncu predorske cevi je morebitna hitrost vetra, usmerjenega proti izstopu iz predora, manjša od hitrosti iz predora izstopajočega zraka. Zato jo upoštevamo kot potrebno povišanje tlaka. Upoštevali smo povprečni koeficient zračnega upora $c = 0,35$ in povprečno čelno površino vozil, ki znaša $A_v = 2,3 \text{ m}^2$. (Modic, 2021)

Zato je v preglednicah pod oznako smer zraka** vedno določena z enačbo:

$$\text{"smer"} = \text{ventilatorji} + \text{batni efekt} - \text{burja".} \quad (37)$$

Ventilatorji v vzhodni predorski cevi so izključeni v enem primeru, v ostalih pa je poskusno vključenih vseh 7 parov. Hitrosti zraka so višje v primeru nižjih hitrosti burje, oz. z večanjem hitrosti burje se znižuje hitrost zraka v nasprotni smeri, ki je pomemben pri zagotavljanju ti. batnega efekta. Batni efekt, ki ga povzročajo s svojim gibanjem vozila, je pomemben pri zagotavljanju odvajanja dimnih plinov iz predora. Tudi količina zraka Q , se z večanjem hitrosti burje zmanjšuje.

Pri 200 Pa (65 km/h), ki velja za neko povprečno hitrost burje, je bila simulacija izvedena z in brez ventilatorjev. Ugotovimo lahko, da sta v primeru brez ventilatorjev hitrost zraka in količina zraka skoraj za 1/3 nižja od vrednosti v primeru, ko ventilatorji delujejo.

Na osnovi navedenega trdimo, da so ventilatorji potrebni za vzdrževanje ustreznih razmer v predorski cevi. V Preglednici 9, kjer so prikazane posamezne veličine, lahko ugotovimo, da se sredi vzhodne predorske cevi povečuje količina dima, CO in NO₂, še posebej sta vrednosti visoki v primerih, ko ni vetra (0 Pa) in ko so pri tlaku zraka 200 Pa ventilatorji izključeni.

Na izhodu iz predorske cevi so vrednosti praktično enake, kar pomeni, da kljub različnim hitrostim vetra, mehansko prezračevanje opravlja svoje delo.

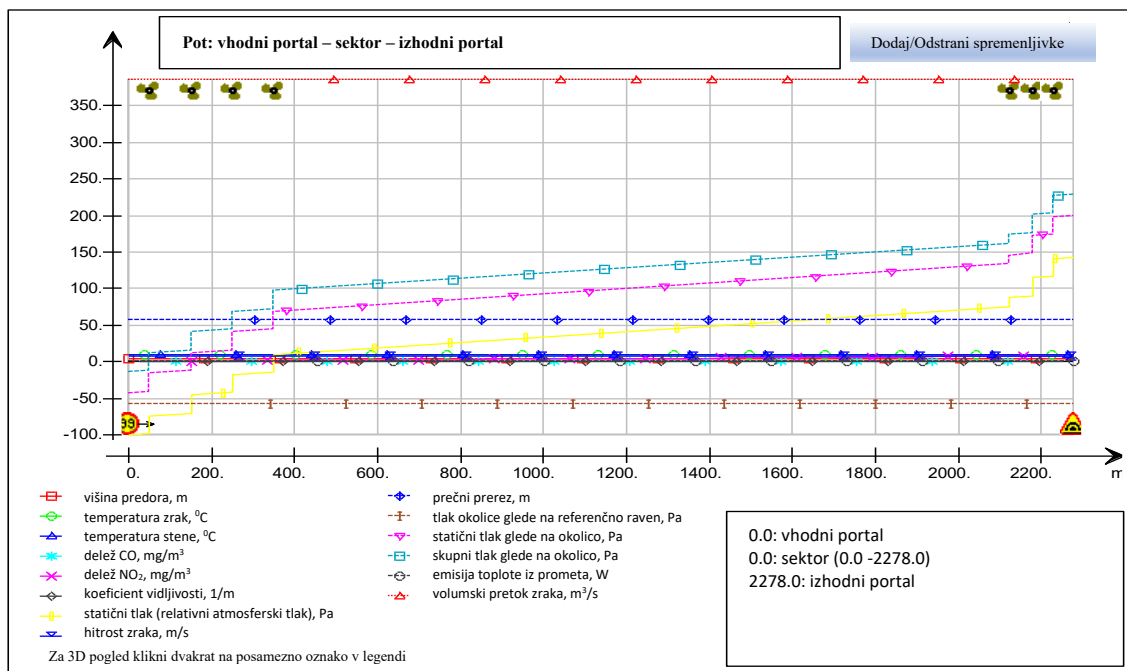
6.2.1.2 GRAFIČNI PRIKAZ RAZMER V PREDORSKI CEVI, KO NI POŽARA

Scenarij 1:

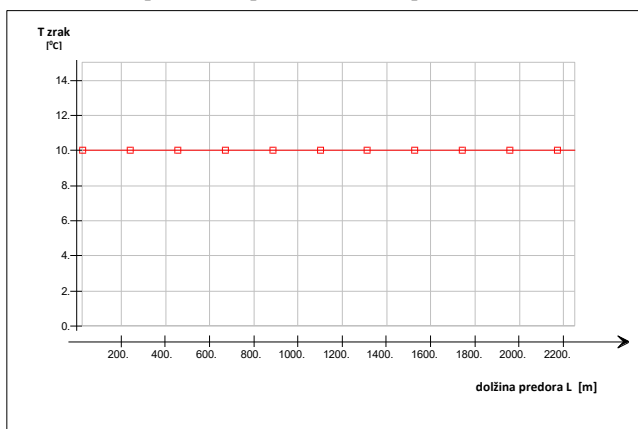
Na Grafu 5 je prikazan višinski potek trase, potek statičnega tlaka, potek koncentracij CO, NO₂, ekstinkcije, poteka temperatur zraka in površin (glej legendo).

Simulacija zajema: požara ni, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 200 Pa. Moč burje izraža hitrost burje. Dolžina vzhodne cevi predora Kastelec je $L = 2278$ metrov. Čas simulacije je $t = 1 \text{ h}$.

Graf 5: Kastelec - vzhodna cev, brez požara, vzdolžno prezračevanje, ventilatorji vključeni, grafični prikaz razmer pri 200Pa



Graf 6: Prikaz poteka temperature zraka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m

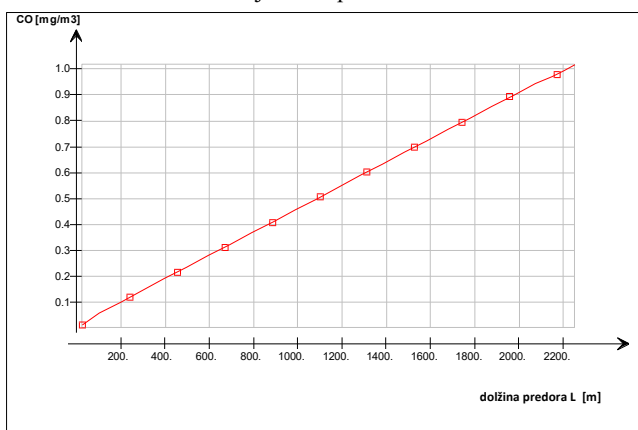


Graf 6

Prikaz temperature zraka $T_{zr}=10^{\circ}\text{C}$. Le-ta je enaka na celotni dolžini vzhodne predorske cevi, v dolžini $L = 2278$ m.

Vključeni so vsi ventilatorji. Nasproti vožnji vozil piha burja z močjo 200 Pa.

Graf 7: Prikaz koncentracije CO v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



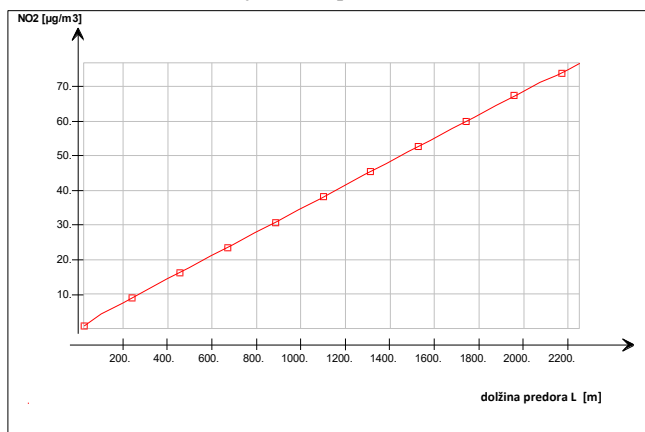
Graf 7

prikazuje, kako se zaradi batnega efekta od vhoda v predor do izhoda iz predorske cevi, konstantno dviga koncentracija CO, v dolžini L , od 0 do 2278 m.

Vključeni so vsi potisni ventilatorji.

Nasproti vožnji vozil piha burja z močjo 200 Pa.

Graf 8: Prikaz koncentracije NO₂ v predorski cevi na dolžini L = 2278 m



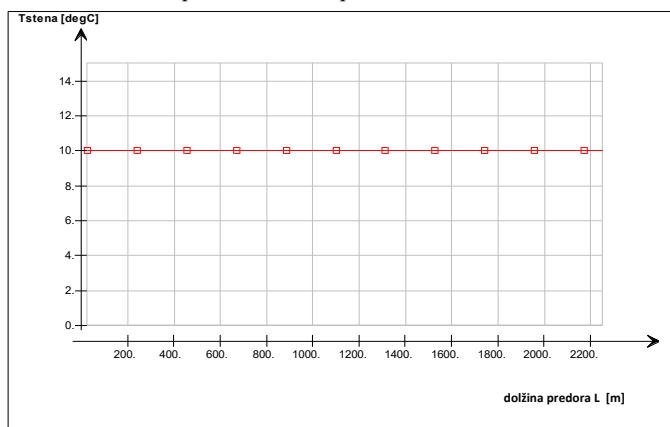
Graf 8

prikazuje potek koncentracije NO₂ v predorski cevi v dolžini L = 2278 m. Batni efekt povzročajo vozila.

Koncentracija se od začetka do konca predorske cevi konstantno povečuje.

Vključeni so vsi ventilatorji. Nasproti vožnji vozil piha burja z močjo 200 Pa.

Graf 9: Prikaz temperature stene v predorski cevi na dolžini L = 2278 m

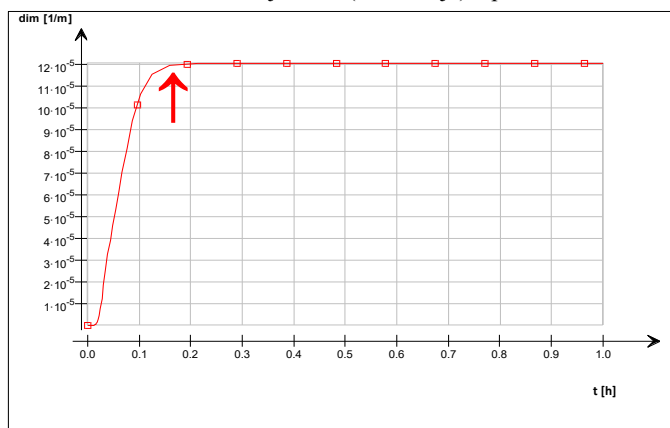


Na Grafu 9

lahko iz prikaza temperature zraka stene T_{stena} vidimo, da je ta na celotni dolžini predora L = 2278 m, enaka.

Vključeni so vsi ventilatorji. Nasproti vožnji vozil piha burja z močjo 200 Pa.

Graf 10: Prikaz koncentracije dima (ekstinkcije) v predorski cevi v času t = 8 min



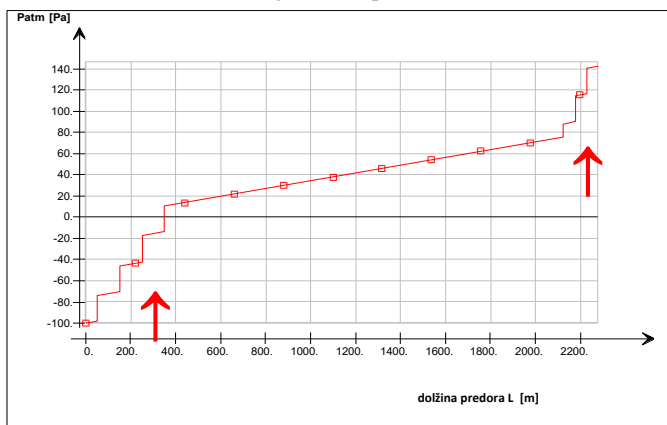
Na Grafu 10

je prikazan potek ekstinkcije, zmanjšanje vidljivosti zaradi povečanja koncentracije dima v predorski cevi, v času t = 8 minut.

Po t = 8 min se koncentracija ustali.

Vrednost koncentracije dima se od vstopa v predor močno poveča.

Graf 11: Prikaz atmosferskega tlaka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m

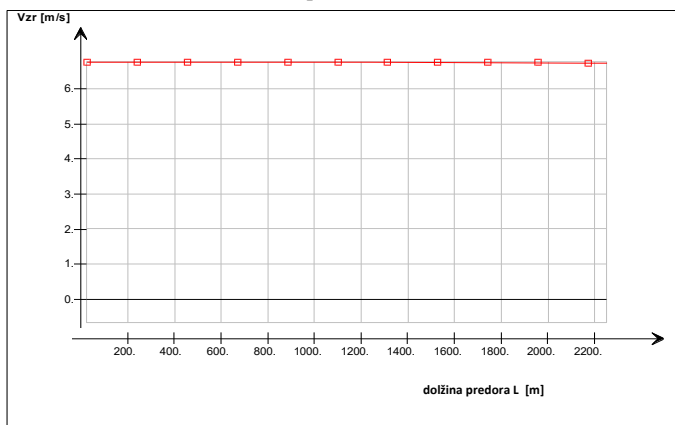


Graf 11

prikazuje spreminjanje poteka atmosferskega tlaka v predorski cevi pri vključenih vseh 14 potisnih ventilatorjih.

Tlak narašča po vsej predorski cevi, v dolžini $L = 2278$ m, najbolj pa v območju ventilatorjev.

Graf 12: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m

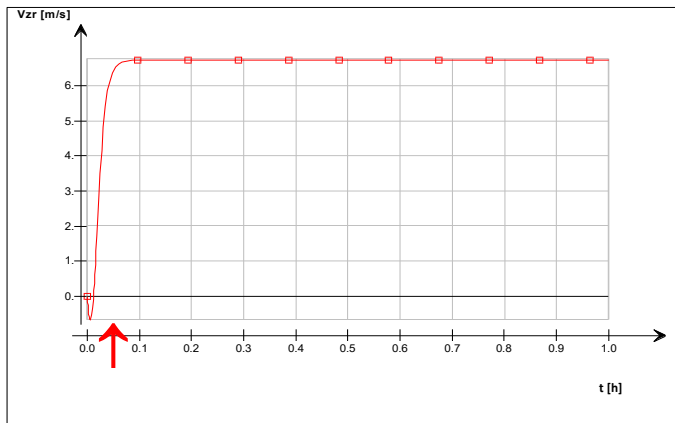


Graf 12

prikazuje hitrost zraka v predorski cevi pri vključenih vseh 14 potisnih ventilatorjih.

Vrednosti hitrosti zraka, $V_{zr}=6,5$ m/s, so na vsej dolžini enake in se ne spreminjajo, tudi zaradi batnega efekta, ki ga povzročajo vozila.

Graf 13: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi v času $t = 180$ s



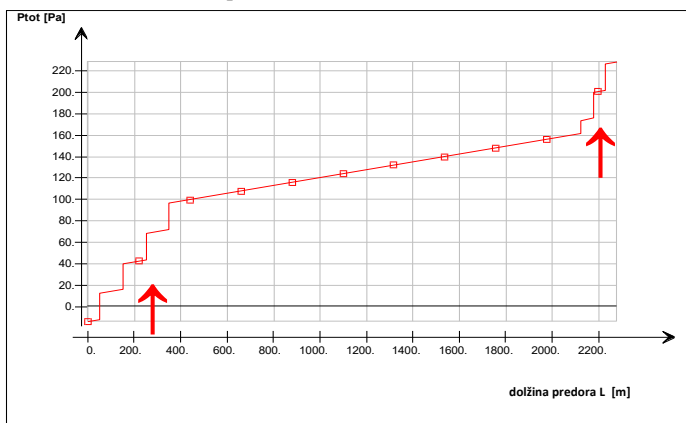
Na Grafu 13

prikažemo hitrost zraka v v točki $t = 180$ s.

Vključeni so vsi ventilatorji.

Vidimo, da je v okviru predpisanih 180 sekund ali več, hitrost zraka višja od predpisane minimalne hitrosti 1.50 m/s, in hkrati dovolj visoka, da ni povratnega gibanja dima.

Graf 14: Prikaz tlaka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



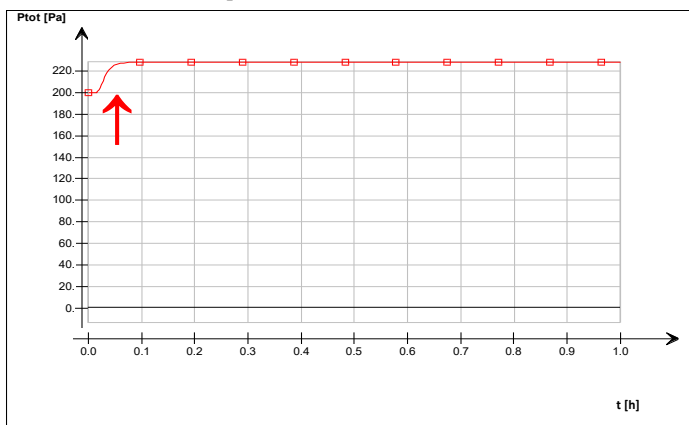
Graf 14

prikazuje potek spreminjanja tlaka v predorski cevi pri vključenih vseh 14 ventilatorjih, na dolžini $L = 2278$ m.

Tlak zraka najbolj narašča v območju ventilatorjev.

Končni tlak zraka je višji od tlaka, ki ga ustvari burja. Zato povratnega toka ni!

Graf 15: Prikaz tlaka v predorski cevi v času $t = 180$ s



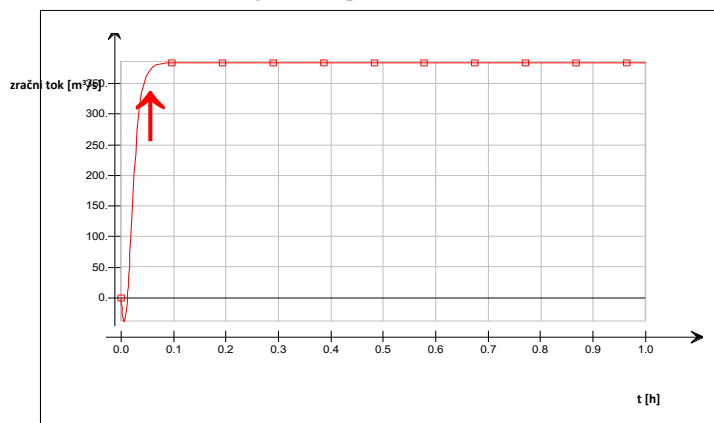
Graf 15

prikazuje časovni potek spreminjanja tlaka v predorski cevi pri vključenih vseh 14 ventilatorjih.

Tlak, ki preprečuje povratno gibanje dima se pojavi po 180s.

Končni tlak zraka, $p > 200$ Pa, je višji od tlaka, ki ga ustvari burja, $p = 200$ Pa.

Graf 16: Prikaz zračnega toka v predorski cevi v času $t = 180$ s



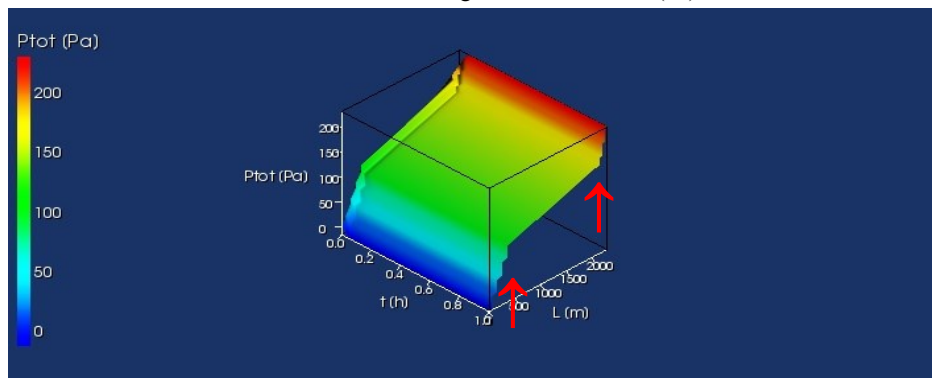
Graf 16

prikazuje zračni tok v času $t = 180$ s.

Ugotovimo lahko, da je zračni tok od 3. minute naprej (180 s) konstanten.

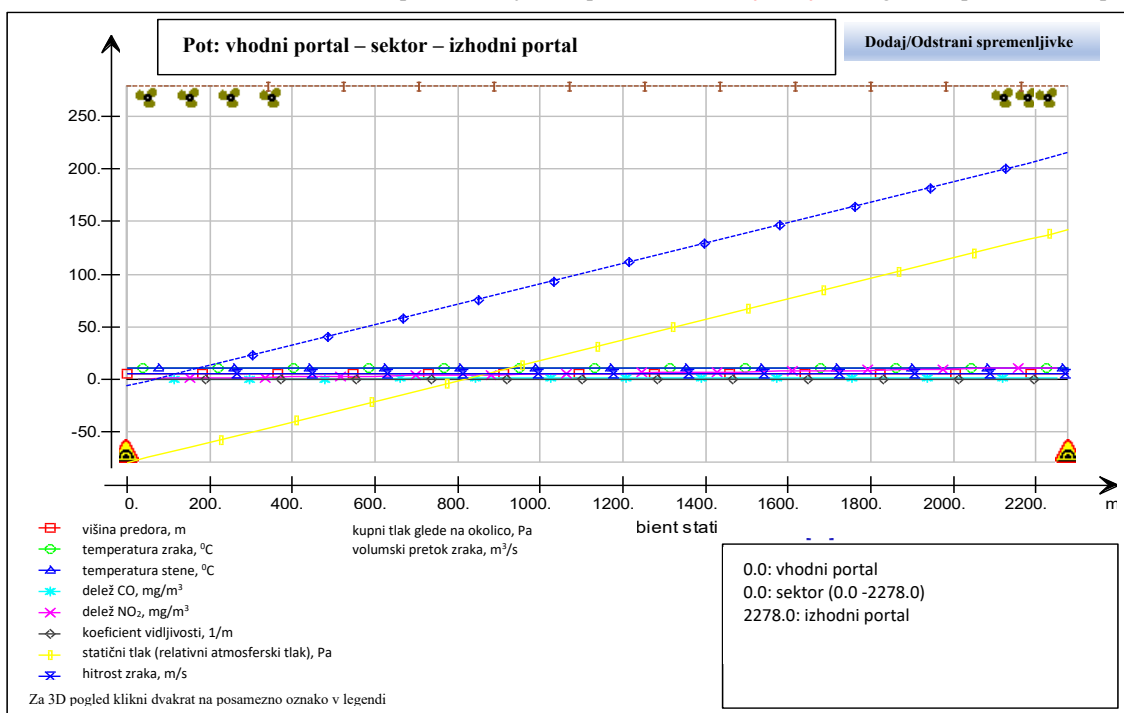
Prikazane so še druge možnosti programa IDA RTV. Rezultate simulacije lahko prikažemo tudi v trirazsežni (3D) obliki. Slike lahko tudi priredimo: razmerje osi, napise, fokus, ipd.

Graf 17: Potek atmosferskega tlaka v 3D obliki (Pa)



Scenarij 2:

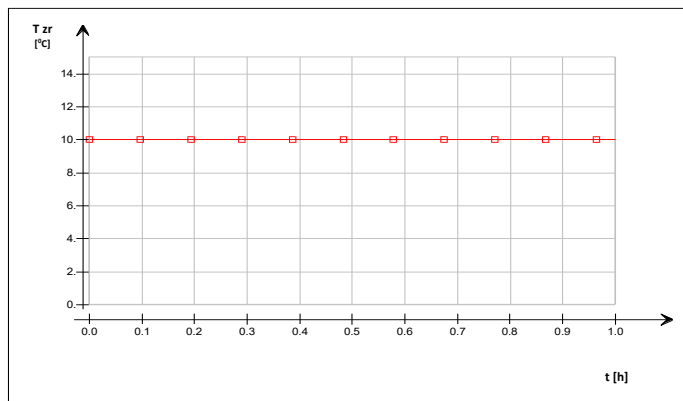
Graf 18: Predor Kastelec - vzhodna cev, naravno prezračevanje brez požara, **ventilatorji izključeni**, grafični prikaz razmer pri 200 Pa



Na Grafu 18 je prikazan višinski potek trase ceste v predoru, potek statičnega tlaka, potek koncentracij CO, NO₂, ekstinkcije, poteka temperatur zraka in površin (glej legendo).

Simulacija: požara ni, izključeni so vsi ventilatorji, moč burje 200 Pa. Dolžina predora je $L = 2278$ m. Čas simulacije $t = 1$ h.

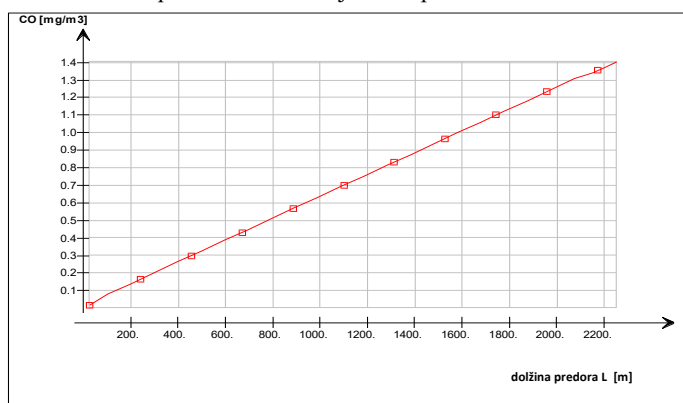
Graf 19: Prikaz poteka temperature zraka v predorski cevi v odvisnosti od časa t



Na Grafu 19

lahko iz grafičnega prikaza vidimo, da je temperatura zraka $T_{\text{zr}}=10^{\circ}\text{C}$ v dolžini predora $L = 2278$ m, ves čas simulacije enaka.

Graf 20: Prikaz poteka koncentracije CO v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



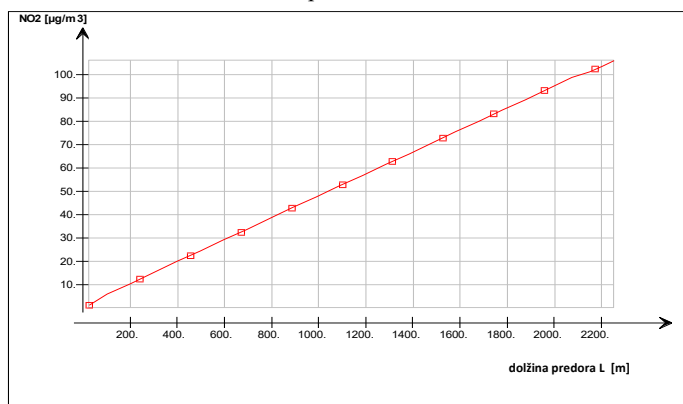
Graf 20

prikazuje potek koncentracije CO v predorski cevi, v dolžini $L = 2278$ m.

Vrednost koncentracije CO konstantno narašča. Izključeni so vsi ventilatorji. Nasproti vožnji vozil piha burja z močjo 200 Pa.

Če primerjamo količine s količinami na Grafu 7, vidimo, da je koncentracija v primeru nedelovanja ventilatorjev za skoraj 40% večja, kar ni skladno z zakonodajo.

Graf 21: Prikaz količine NO_2 v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



Graf 21

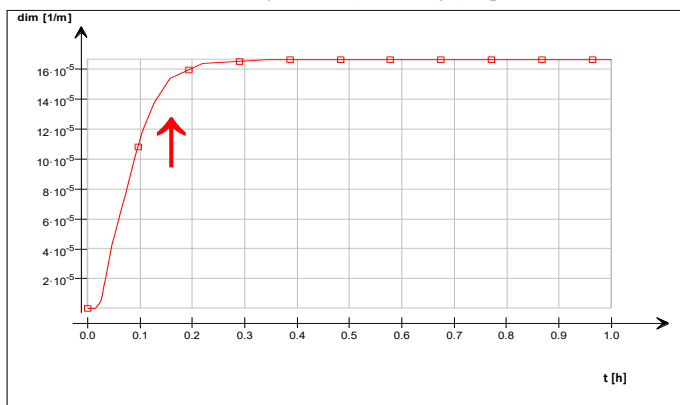
prikazuje potek naraščanja koncentracije NO_2 v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m.

Izključeni so vsi ventilatorji.

Vrednost se od začetka do konca predora linearno in konstantno povečuje. Glede na Graf 8, so vrednosti večje za skoraj 30%, kar ni skladno z zakonodajo.

Nasproti vožnji vozil piha burja z močjo 200 Pa.

Graf 22: Prikaz koncentracija dima (ekstinkcije) v predorski cevi v času $t = 8$ min



Graf 22

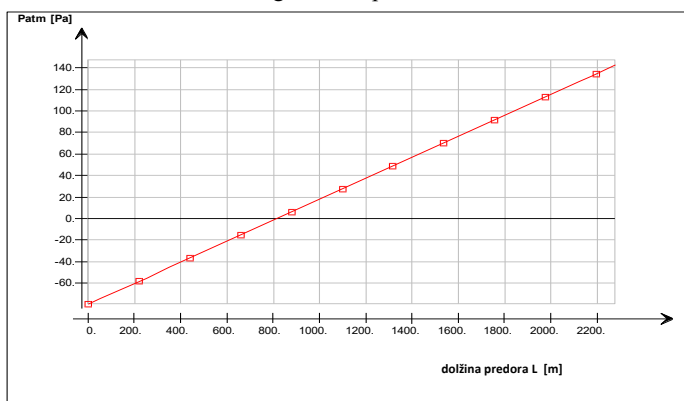
prikazuje potek ekstinkcije (koncentracije dima) v predorski cevi v času $t = 8$ min.

Vrednost koncentracije se v prvih 8 minutah močno poveča, potem ostane nespremenjena.

Model potrjuje, da batni efekt vzdržuje konstantno vrednost koncentracije dima.

Ventilatorji so izključeni.

Graf 23: Prikaz atmosferskega tlaka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m

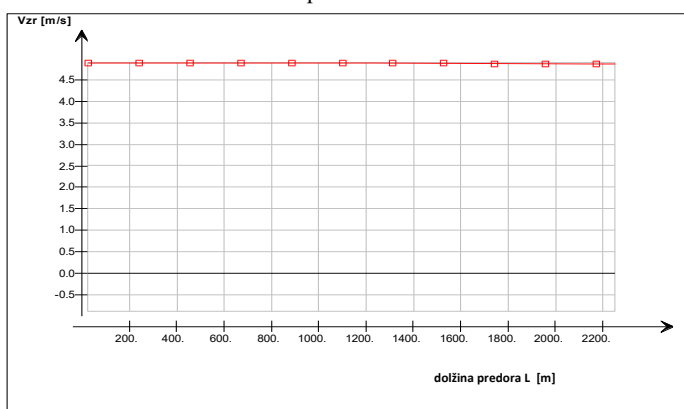


Graf 23

prikazuje potek naraščanja atmosferskega tlaka v predorski cevi pri izključenih ventilatorjih.

Tlak narašča linearno konstantno od vhoda do izhoda iz predorski cevi, kar je posledica batnega efekta zaradi gibanja vozil v isti smeri, po vsej dolžini $L = 2278$ m.

Graf 24: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m

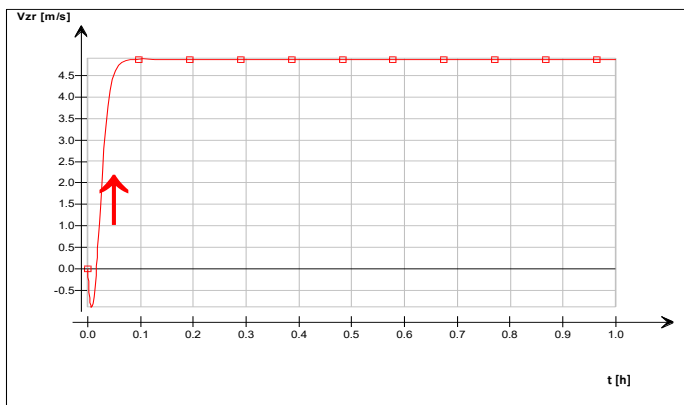


Graf 24

prikazuje hitrost zraka v predorski cevi pri izključenih ventilatorjih, v dolžini predora $L = 2278$ m.

Hitrost zraka $v_{zr}=5,0$ m/s je glede na Graf 13, $v_{zr}=6,5$ m/s, nižja, vendar še vedno dovolj velika in ustreza zakonodaji.

Graf 25: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi v času $t = 180$ s



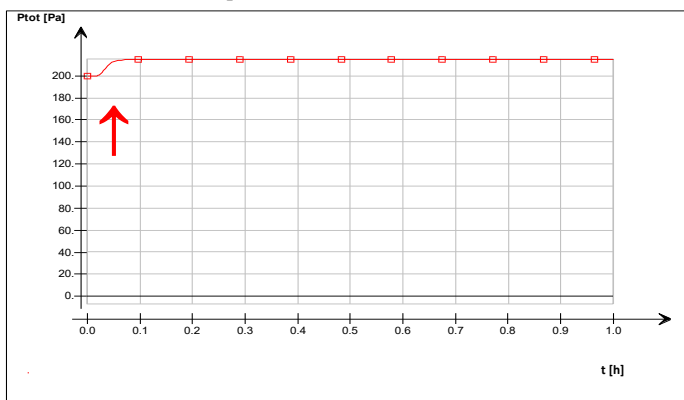
Graf 25

prikazuje časovni potek hitrosti zraka v predorski cevi pri izključenih ventilatorjih.

Iz slike vidimo, da v okviru zahtevanih 180 sekund dosežemo višjo hitrost zraka od predpisane minimalne hitrosti 1.50 m/s, in je dovolj visoka, da ni povratnega gibanja dima.

Model potrjuje, da batni efekt vzdržuje konstantno vrednost hitrosti zraka.

Graf 26: Prikaz tlaka v predorski cevi v času t



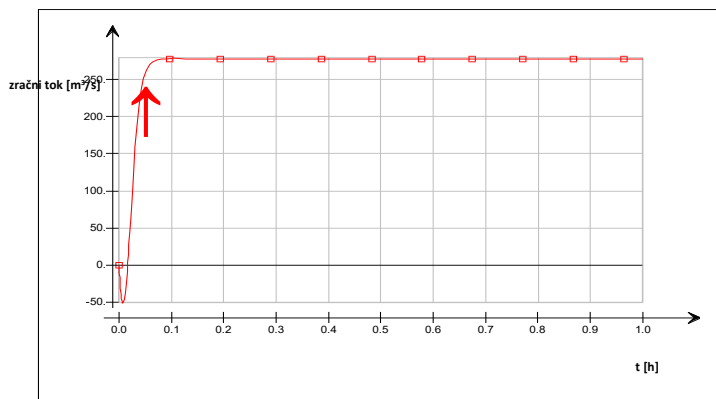
Graf 26

prikazuje potek tlaka v predorski cevi pri izključenih ventilatorjih.

Tlak zraka v predoru, ki preprečuje povratno gibanje dima, doseže ustrezno vrednost po 3 minutah (180 s).

Končni tlak, $p > 220$ pa, je višji od tlaka, ki ga ustvari burja, $p = 200$ pa.

Graf 27: Prikaz zračnega toka v predorski cevi v času $t = 180$ s



Graf 27

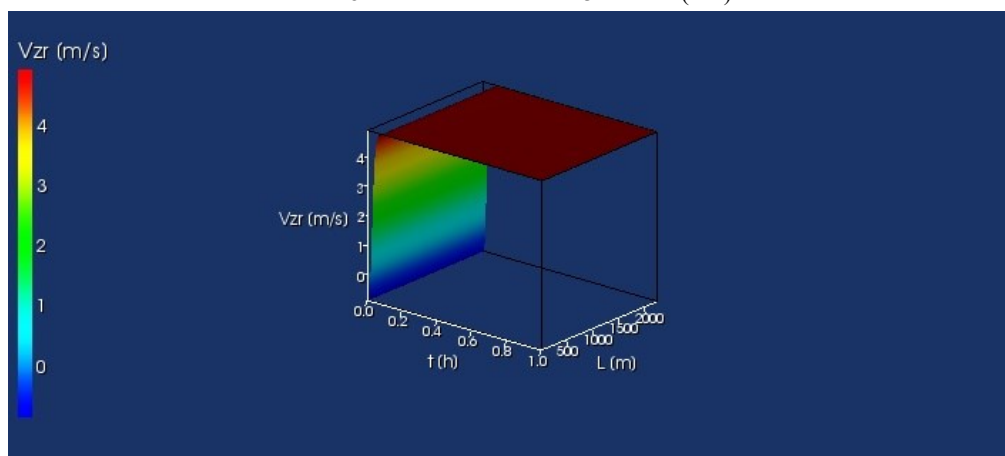
prikazuje zračni tok v predorski cevi v času $t = 180$ s.

Ugotovimo lahko, da je zračni tok konstanten od 3. minute naprej (180 s).

Model potrjuje, da batni efekt vzdržuje konstantno vrednost zračnega toka.

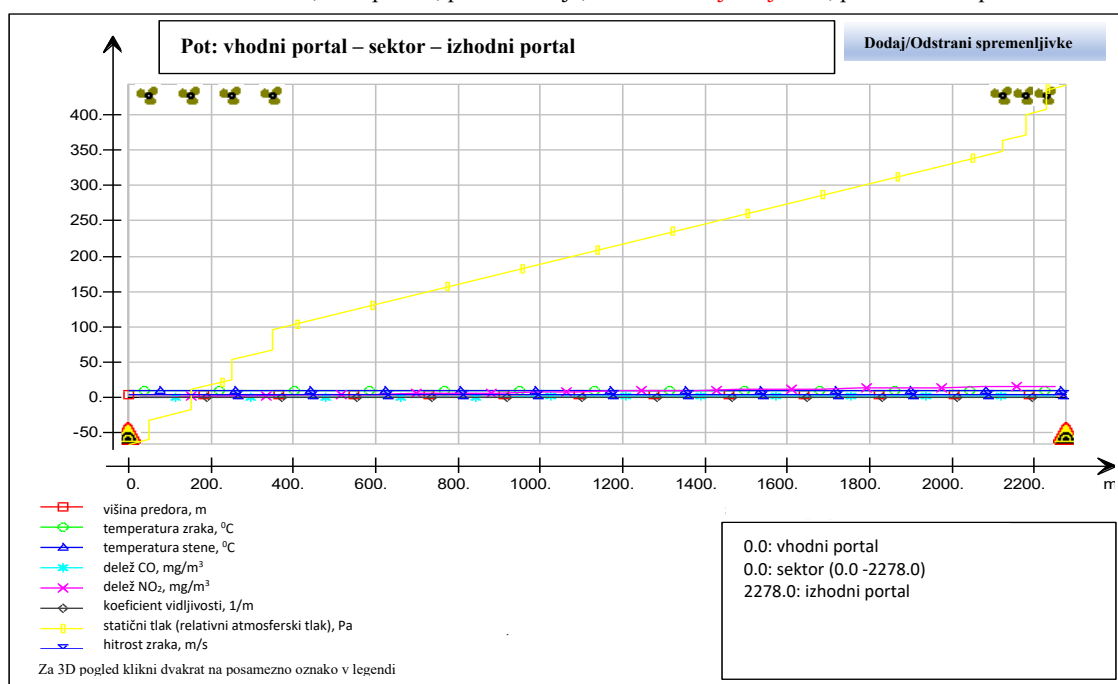
PRIKAZ DOBLJENIH VREDNOSTI S 3D DIAGRAMI:

Graf 28: Potek hitrosti zraka v 3D obliki (m/s)



Scenarij 3:

Graf 29: Kastelec - vzhodna cev, brez požara, prezračevanje, vsi **ventilatorji vključeni**, prikaz razmer pri tlaku zraka 500 Pa

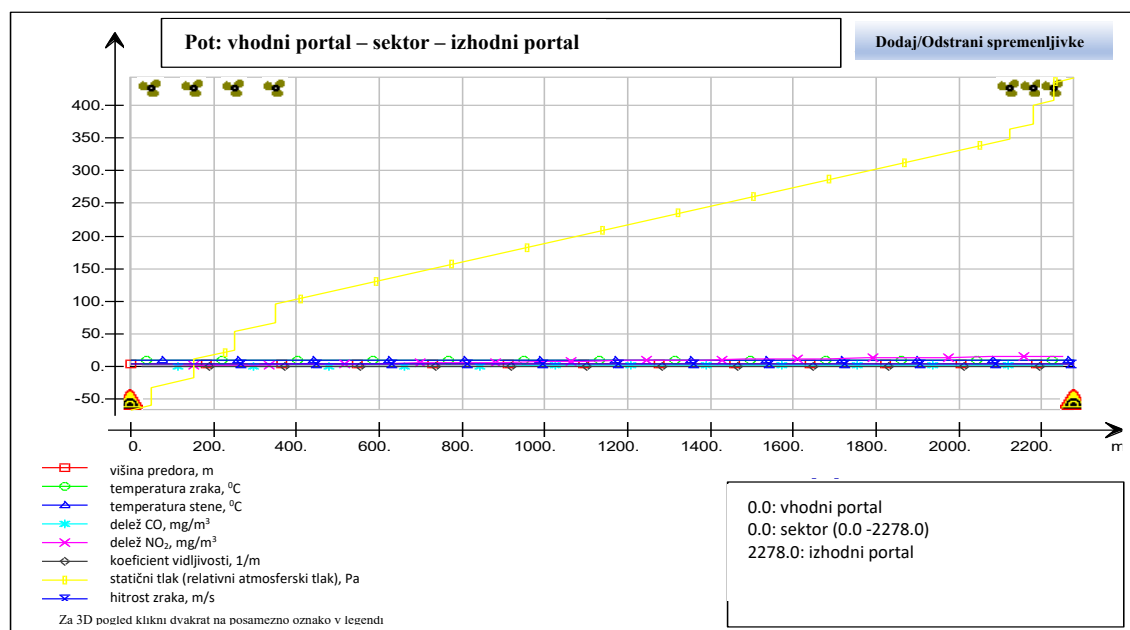
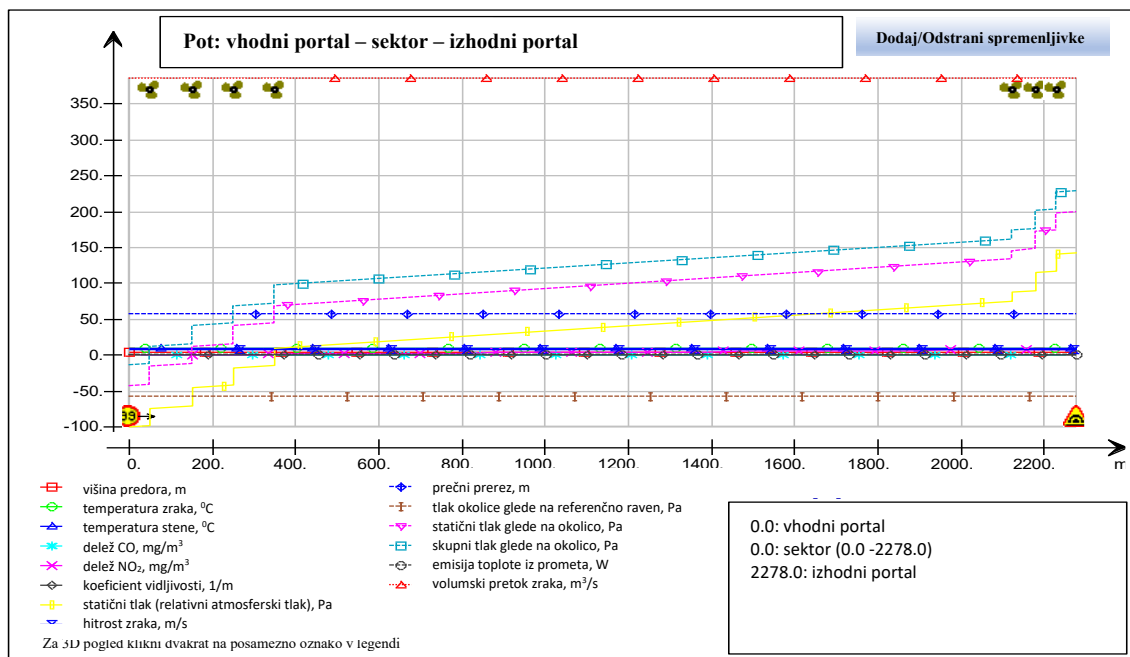


Na Grafu 29 je prikazan grafični višinski potek trase, potek statičnega tlaka, potek koncentracij CO, NO₂, ekstinkcije, poteka temperatur zraka in površin (glej legendo).

Scenarij: Požara ni, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje 500 Pa. Dolžina predora je $L = 2278$ m. Čas simulacije je $t = 1$ h.

Primerjava 1:

Graf 30: Kastelec - vzhodna cev, brez požara, prezračevanje, vsi ventilatorji vključeni, grafični prikaz razmer pri 200 in 500 Pa

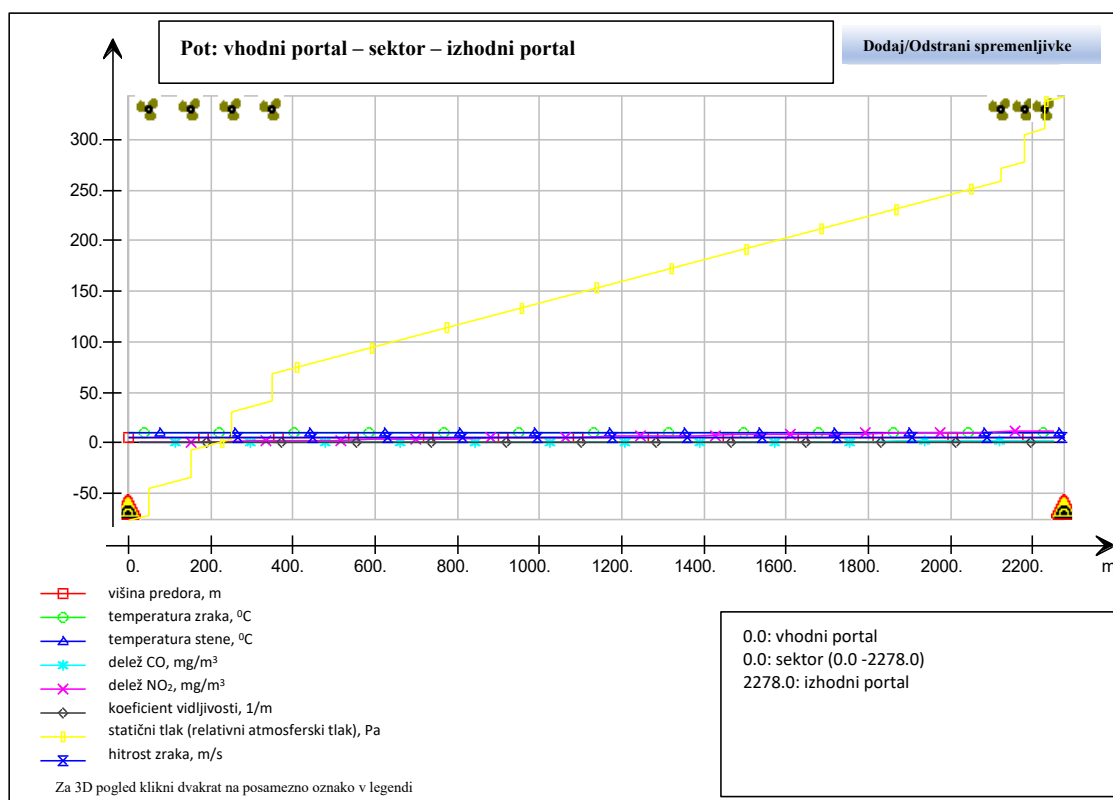
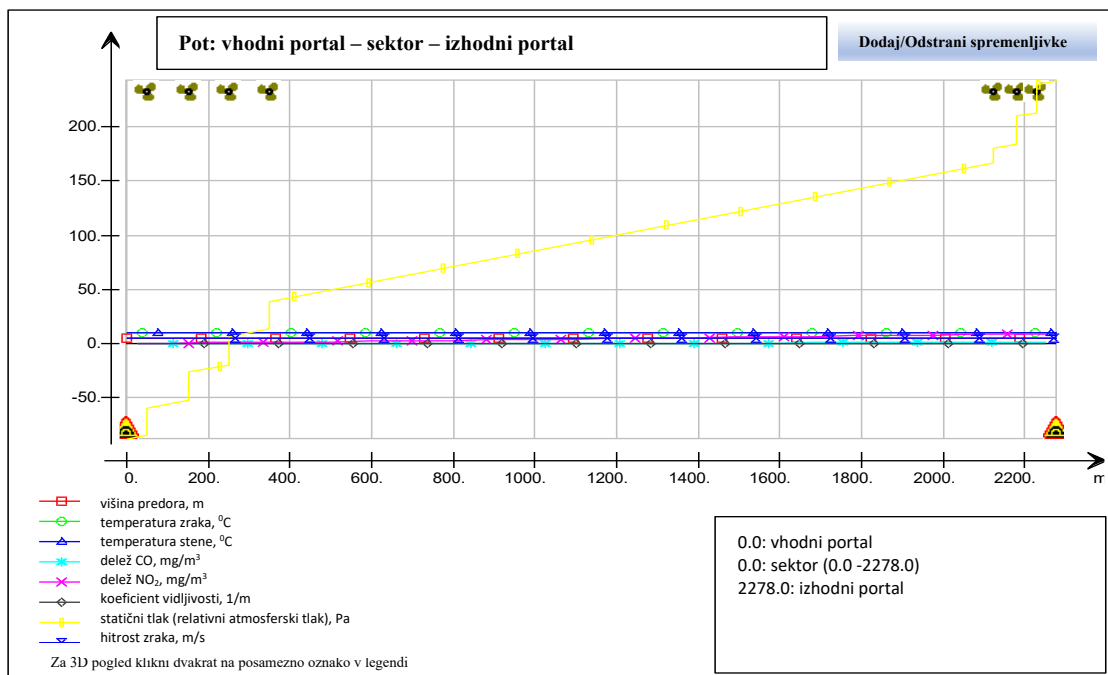


Na Grafu 30 lahko primerjamo gibanje zraka pri različnih tlakih. Iz Preglednic 7 in 8 lahko razberemo, da sta pri tlaku 500 Pa glede na tlak 200 Pa, vrednosti količine vhodnega zraka in vhodne hitrost zraka za polovico nižja, na izhodu iz predorske cevi pa so količine CO, NO₂ in dima skoraj enake.

Tudi ta primerjava pokaže, da je raba potisnih ventilatorjev in s tem uravnavanje količin zraka v predorski cevi, nujno potrebna za zagotavljanje predpisane varnosti v predoru.

Primerjava 2:

Graf 31: Kastelec – vzhodna cev, brez požara, prezračevanje, ventilatorji vključeni, grafični prikaz razmer pri 300 in 400 Pa

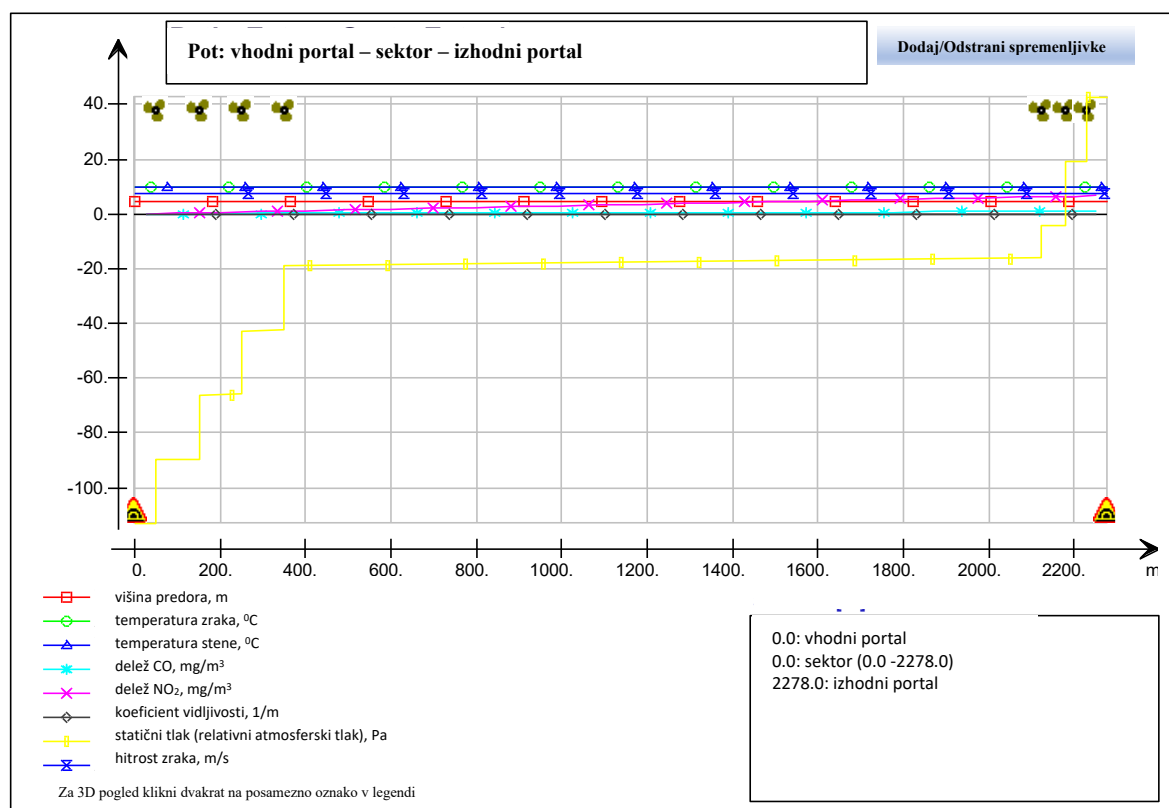
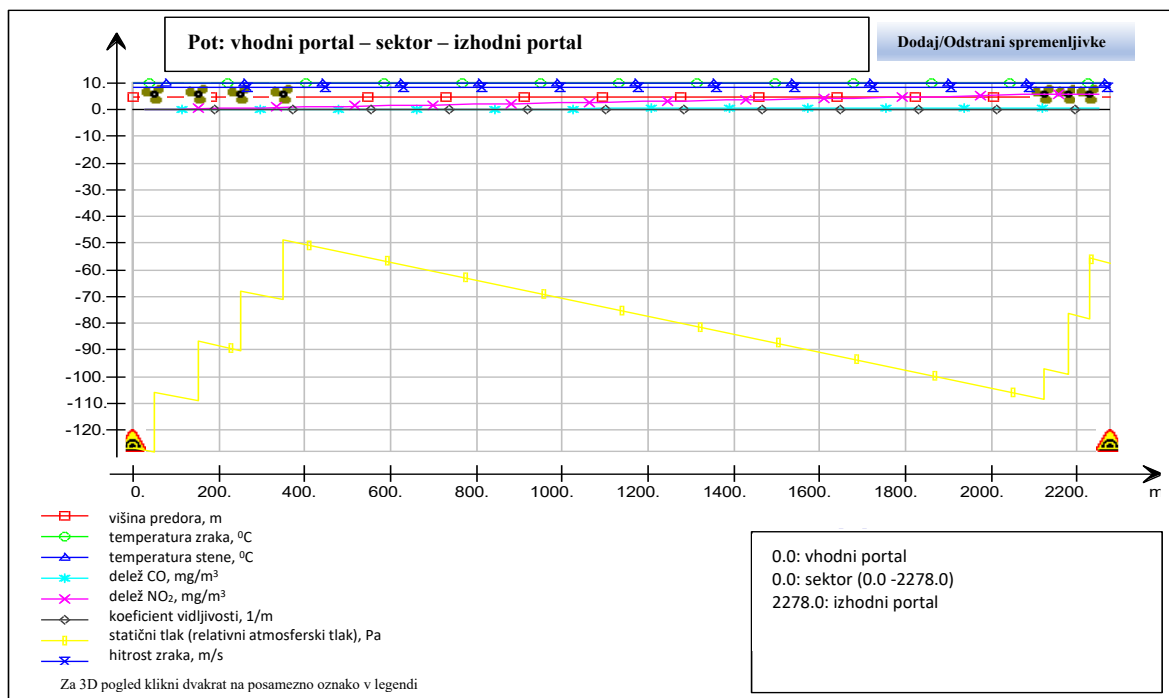


Primerjava gibanja zraka v predorski cevi pri tlakih 300 in 400 Pa.

Iz Preglednic 8 in 9 lahko razberemo, da sta pri tlaku 400 Pa glede na tlak 300 Pa, vrednosti količine vhodnega zraka in vhodne hitrost zraka za petino nižja, na izhodu iz predorski cevi pa so količine CO, NO₂ in dima skoraj enake.

Primerjava 3:

Graf 32: Kastelec - vzhodna cev, brez požara, prezračevanje, vsi ventilatorji vključeni, grafični prikaz razmer pri 0 in 100 Pa



Podobno kot pri *Grafih 30 in 31*, tudi pri *Grafu 32*, kjer je prikazana primerjava tlakov 0 in 100 Pa, ugotovimo, da se z višjo hitrostjo vetra, znižuje vstopna hitrost zraka in količina svežega zraka.

6.2.1.3 POVZETEK MERITEV, KO NI POŽARA

Primerjava različnih hitrosti vetra - burje pri pogojih brez požara pokaže, da so, ne glede na velikost tlakov vetra, število vključenih ventilatorjev, hitrost vozil, ki ne preseže omejitev 100 km/h, vrednosti merjenih količin: CO, NO₂, dima, znotraj dovoljenih vrednosti.

V primeru ko požara ni, kritične, oz. mejne vrednosti hitrosti zraka ni potrebno računati, oz. meriti. V normalnih voznih in meteoroloških razmerah že samo gibanje vozil, in s tem povzročeni batni efekt, omogoča ustrezno prezračevanje predora. Po RVS predpisih mora med obratovanjem predora hitrost zraka znašati vsaj 1.5 m/s.

Kljub temu je treba v približno 8% vseh izmerjenih vrednosti vetra - burje, ko sunki vetra povzročijo gibanje zraka v predoru v nasprotni smeri prometa, predor zapreti, saj bi v primeru nesreče in požara dim ogrožal vse udeležence v prometu.

6.2.2.1 ANALIZA RAZMER V PREDORU V PRIMERU POŽARA

Za prikaz uporabe računalniškega programa smo izbrali vzhodno cev predora Kastelec. Izvedena je simulacija požara, z delujočimi ventilatorji in pri hitrosti vožnje 50 km/h, upoštevana je sprememba naklona in vpliv vetra.

Preglednica 10: Analiza prezračevalnih razmer v predoru v primeru enake moči in lokacije požara ter različnih tlakov vetra

Prezračevanje	enota	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	Vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno
hitrost vozil	km/h	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
tlak burje	Pa	0	0	100	100	200	200	300	300	400	400	500	500
Ventilatorjev	n	14	12	14	12	14	12	14	12	14	12	14	12
Požar-lokacija	m	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
V _{vent}	m/s	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Jet fans	kW	512.3	437.6	513.2	439.1	521.1	407.7	466.5	412.5	476.8	418	483	421.6
potisk _{vent}	N/kW	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
T _{zrak izhodni portal}	°C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
T _{stena max}	°C	217.45	220.25	231.77	238.79	320.24	281.34	116.81	228.37	219.4	216.5	211.1	208.82
P _{1 vhodni portal}	Pa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{2 izhodni portal}	Pa	0	0	100	100	200	200	300	300	400	400	500	500
Opomba*		14 V+BE-B	12 V+BE-B	14 V+BE-B	12 V+BE-B	14 V+BE-B	12 V+BE-B	14 V+BE-B	12 V+BE-B	14 V+BE-B	12 V+BE-B	14 V+BE-B	12 V+BE-B
P _{levo (-Atm)}	Pa	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45
P _{desno (-Atm)}	Pa	-57.45	-57.45	42.55	42.55	142.55	142.5	242.5	242.5	342.5	342.5	442.5	442.5
Moč požara	MW	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
V _{zrak vhod (batni efekt)}	m/s	4.782	4.437	3.355	2.845	1.046	-1.377	-3.059	-3.5	-4.487	-4.86	-5.62	-5.95
V _{zrak izhod **}	m/s	-4.781	-4.436	-3.351	-2.844	-1.044	1.374	3.05	3.49	4.47	4.842	5.593	5.922
V _{vent}	m/s	2.208	2.208	2.208	2.208	2.208	2.208	2.208	2.207	2.207	2.207	2.207	2.207
Q _{levo}	m ³ /s	272.6	252.9	191.2	162.3	-59.63	-89.21	-202	-230	-291.2	-314.1	-360.1	-380
Q _{desno}	m ³ /s	-284.6	-263.9	-191.6	-168	-59.99	78.32	173.8	198.9	254.8	276	318.9	337.6
Smer vhod izhod	kapaciteta do 3900 vozil, gostota prometa 103.10/km/vozní pas												
Sest. prometa***	1000 OV, 200 TV, 40 TC												

Kjer je:

* V - ventilator, BE - batni efekt, B - burja

** ignoriramo

*** OV - osebna vozila, TV - tovorna vozila, TC - tovorna cisterna

Preglednica 11: Prikaz parametrov zraka v predorski cevi enake moči požarov in različnih hitrosti vetra (congestion)

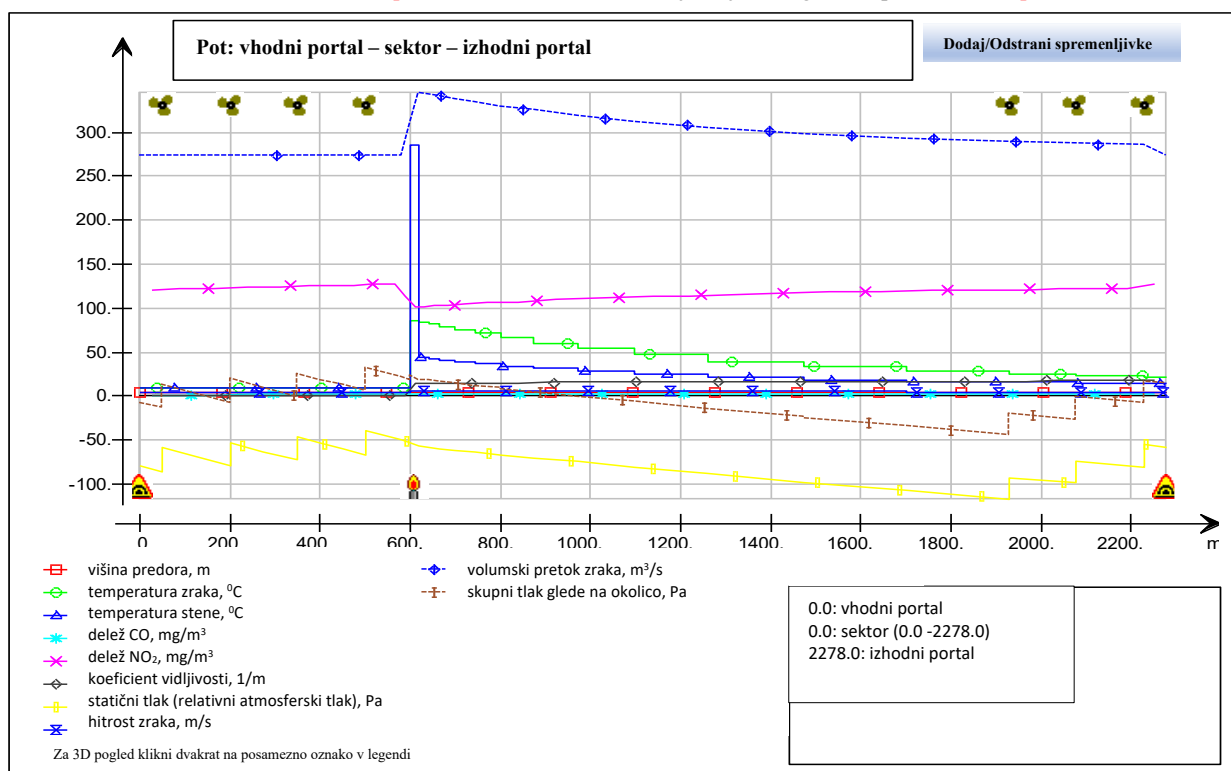
na vходу:	Pa	0	0	100	100	200	200	300	300	400	400	500	500
Motnost toka dima	m ² /s	0	0	0	0	0	6013	6079	6032	5929	5893	5824	5797
CO	mg/s	-340.7	-316.1	-239	-202.8	-74.54	457.9	615	648.7	721.5	748.7	803.2	826.9
NO ₂	µg/s	-328745	-305010	-230616	-195676	-71915	136409	282945	317691	392939	420974	476838	501082
Sektor:													
Motnost toka dima	m ² /s	18.21	19.62	25.99	30.63	83.98	64.13	28.48	24.88	19.39	17.9	15.48	14.62
CO	mg/s	2.228	2.304	2.647	2.896	5.608	4.788	2.838	2.637	2.33	2.246	2.11	2.062
NO ₂	µg/s	1281	1287	1315	1335	1524	1449	1322	1307	1283	1277	1265	1262
Na izhodu:													
Motnost toka dima	m ² /s	5270	5266	5242	5220	5056	0	0	0	0	0	0	0
CO	mg/s	645	618.3	533.9	493.6	337.1	-97.9	-217.3	-248.6	-318.5	-345	-398.6	-422
NO ₂	µg/s	370954	345492	265320	227465	86755	-94456	-209653	-239891	-307300	-332856	-384548	-407167

Scenarij 1:

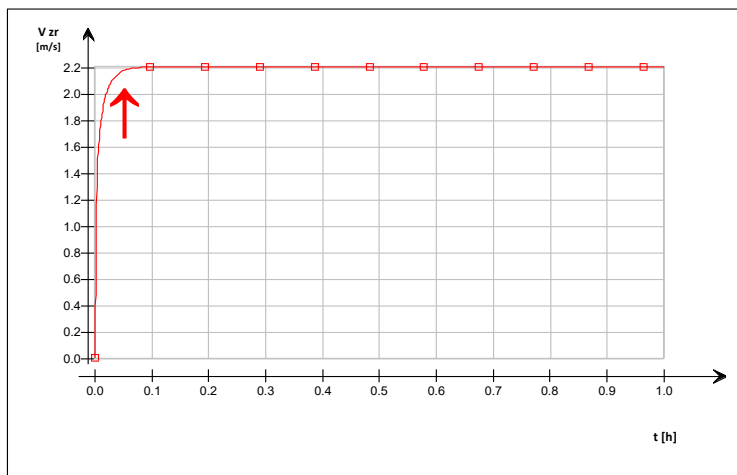
Na Grafu 33 je prikazan grafični potek trase, potek statičnega tlaka zraka v predoru, potek koncentracij CO, NO₂, ekstinkcije, potek temperatur zraka in površin.

Simulacija zajema: požar ima moč 30 MW, vključeni so vsi ventilatorji, 14, moč burje 0 Pa. Dolžina predorske cevi je L = 2278 m. Čas simulacije je t = 1 h.

Graf 33: Kastelec -vzhodna cev, požar na 600 m, vsi ventilatorji vključeni, grafični prikaz razmer pri 0 Pa



Graf 34: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi v času $t = 180$ s

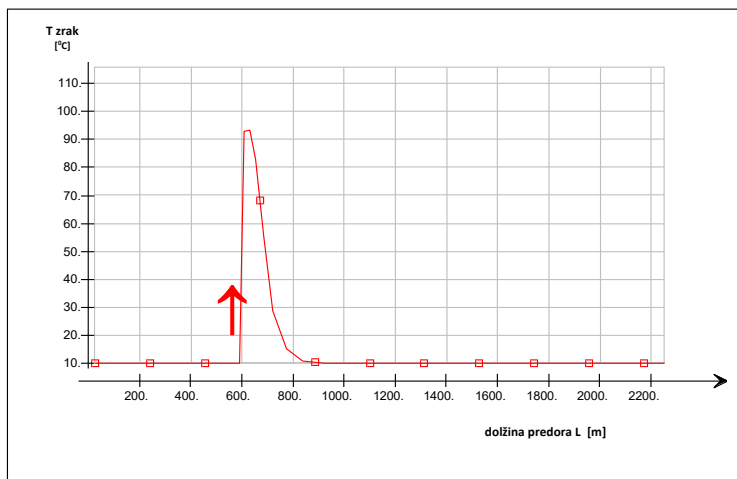


Graf 34

Iz grafa vidimo, da v predpisanih 180 sekundah dosežemo hitrost zraka, višjo od predpisane minimalne hitrosti, 1.50 m/s.

Ta je dovolj velika, da v predorski cevi, kljub požaru, ni povratnega gibanja dima.

Graf 35: Prikaz temperature zraka v predorski cevi na dolžini $L = 600$ m

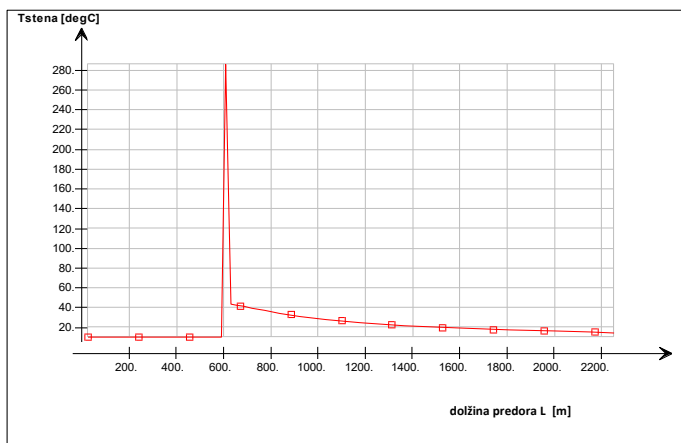


Graf 35

Porast temperature zraka preko 90°C je opazen v območju 600 do 700 metrov od vhoda v predorsko cev.

Območje požara je na 600 m.

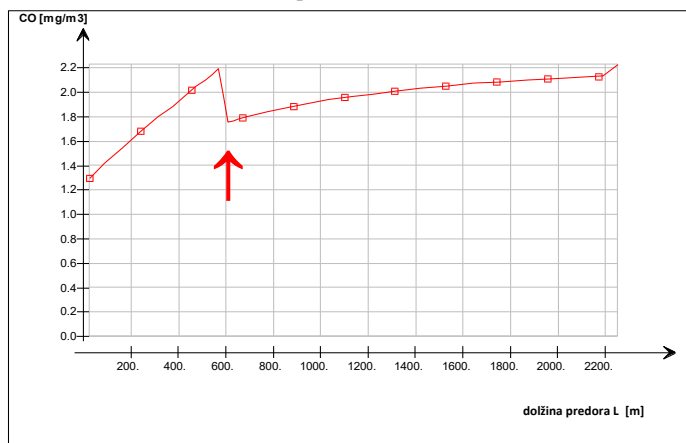
Graf 36: Prikaz temperature stene v predorski cevi na dolžini $L = 600$ m



Grafu 36

Na grafu vidimo, da se v območju požara na dolžini $L = 600$ m od vhoda v predor, temperatura stene predorske cevi močno poveča, tudi preko 280°C , potem pa se proti izhodu počasi ohladi.

Graf 37: Prikaz količine CO v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



Graf 37

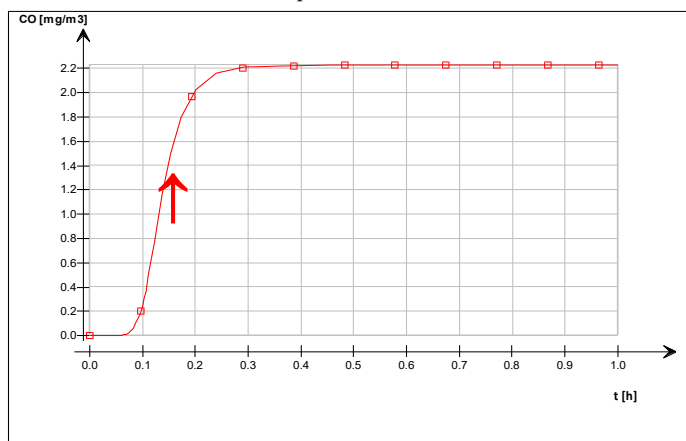
prikazuje potek koncentracije CO v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m.

Del dimnih plinov se nahaja na primarni strani zaradi povratnega gibanja, kar se lepo vidi na območju tik pred požarom.

Za požarom koncentracija CO ponovno narašča, $L = 600$ m.

Vključeni so vsi ventilatorji. Burje ni.

Graf 38: Prikaz količine CO v predorski cevi v času t

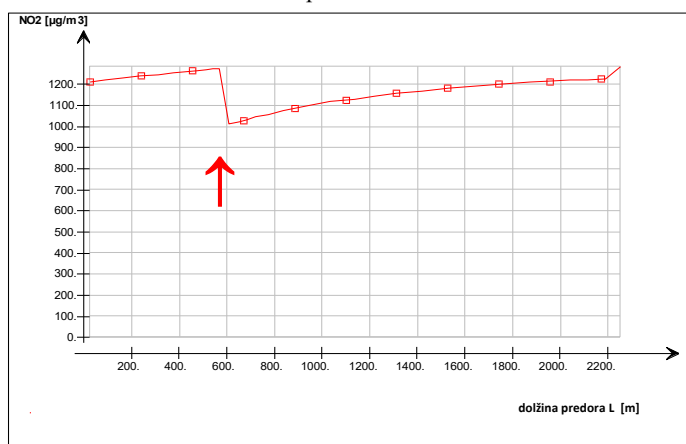


Graf 38

prikazuje potek naraščanja koncentracije CO v predorski cevi v času $t = 15$ min.

Količina CO se v prvih 15 minutah močno povečuje potem pa ostane enaka.

Graf 39: Prikaz količine NO₂ v predorski cevi na dolžini $L = 2278$



Graf 39

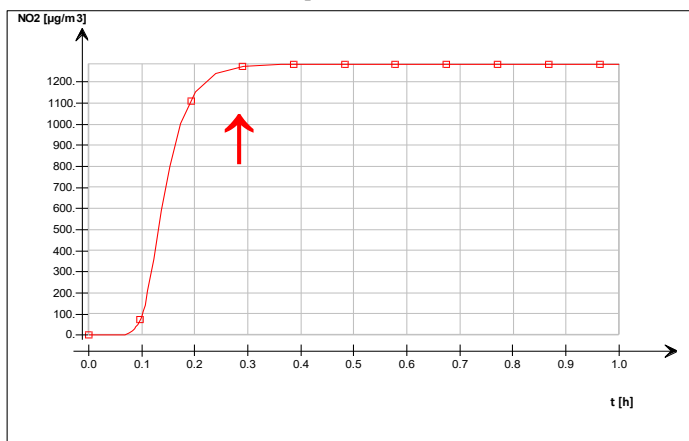
prikazuje potek koncentracije NO₂ v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m.

Podobno kot pri CO, tudi vrednost NO₂ naraste pred požarom, saj del dimnih plinov uide na primarno stran zaradi povratnega gibanja.

Za požarom koncentracija ponovno narašča, $L = 600$ m.

Vključeni so vsi ventilatorji. Burje ni.

Graf 40: Prikaz količine NO₂ v predorski cevi v času t = 18 min



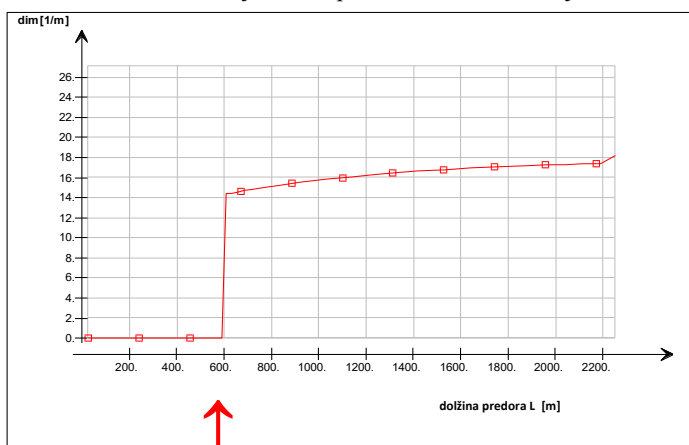
Graf 40

prikazuje potek povečanja koncentracije NO₂ v predoru v času t = 18 min.

Vrednost NO₂ se v prvih 12 minutah močno povečuje, od 18 min naprej pa ostane enaka.

L predorske cevi je 2278 m.

Graf 41: Prikaz ekstinkcije dima v predorski cevi na razdalji L = 2278 m

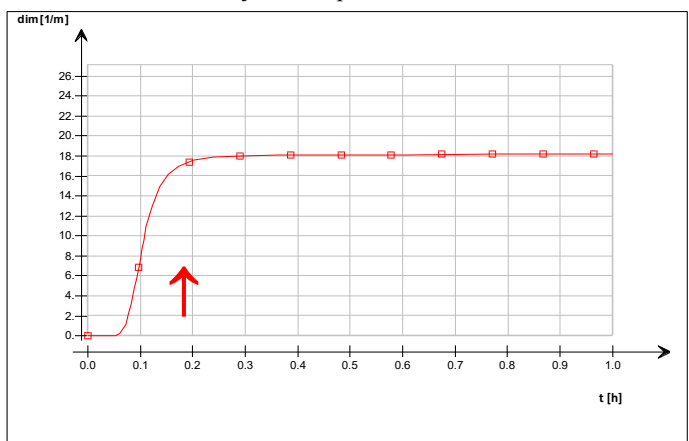


Graf 41

prikazuje potek spreminjanja koncentracije dima (ekstinkcije) v predorski cevi v odvisnosti od nastanka požara, L = 600 m.

Količina dima se v območju požara močno poveča potem pa njegova vrednost ostane do konca predorske cevi skoraj enaka.

Graf 42: Prikaz ekstinkcije dima v predorski cevi v času t = 1 ura

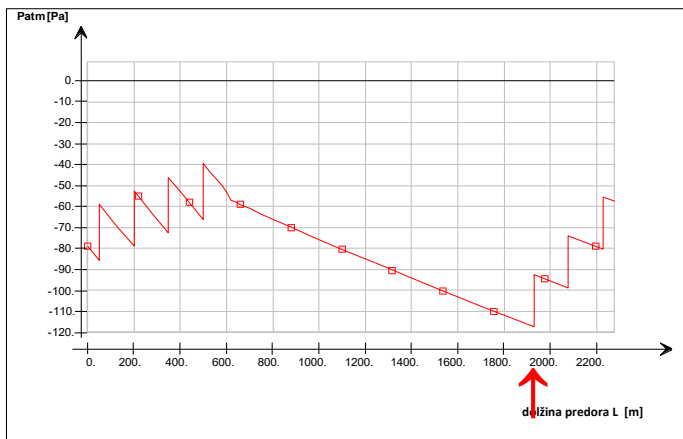


Graf 42

prikazuje potek spreminjanja ekstinkcije (koncentracije dima) v predorski cevi v času t.

Količina dima se v prvih 12 minutah močno poveča potem pa do konca simulacije raven ostane enaka.

Graf 43: Prikaz atmosferskega tlaka v predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m



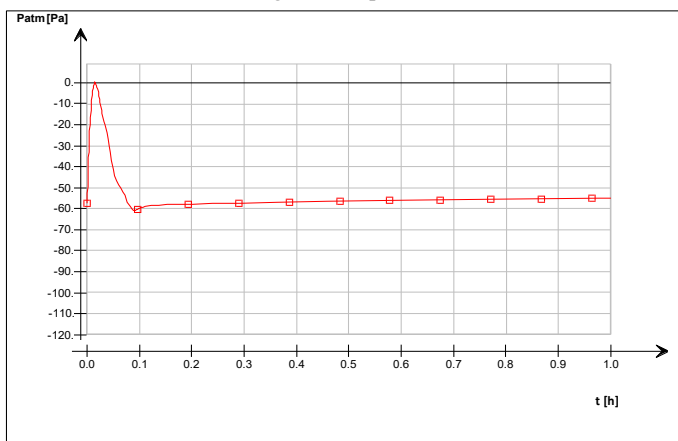
Graf 43

prikazuje potek spreminjanja atmosferskega tlaka zaradi požara v predorski cevi pri vključenih vseh ventilatorjih.

Tlak v sekundarnem delu, za požarom, $L = 600$ m, se močno zniža, v območju ventilatorjev pred izhodom iz predorske cevi pa začne spet naraščati.

Burje ni.

Graf 44: Prikaz atmosferskega tlaka v predorski cevi v času $t = 1$ ura



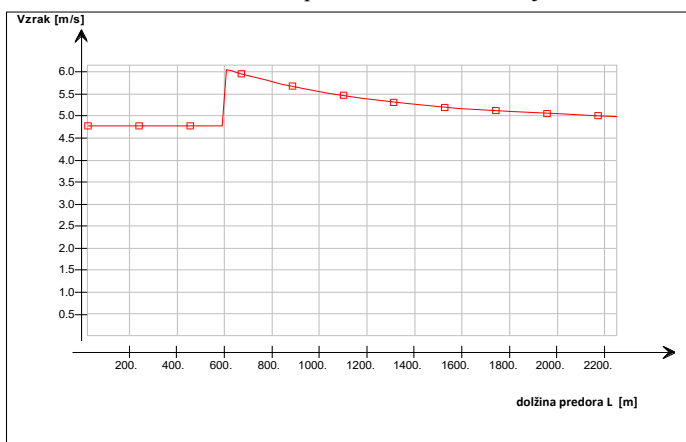
Graf 44

prikazuje spreminjanje vrednosti tlaka v predorski cevi zaradi požara pri vključenih vseh ventilatorjih v času $t = 1$ ura.

Na grafu je viden močan porast tlaka v območju požara, na razdalji 600 m od vhodnega portala.

Po 6 minutah vrednost tlaka ostane skoraj na isti ravni do konca simulacije.

Graf 45: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m



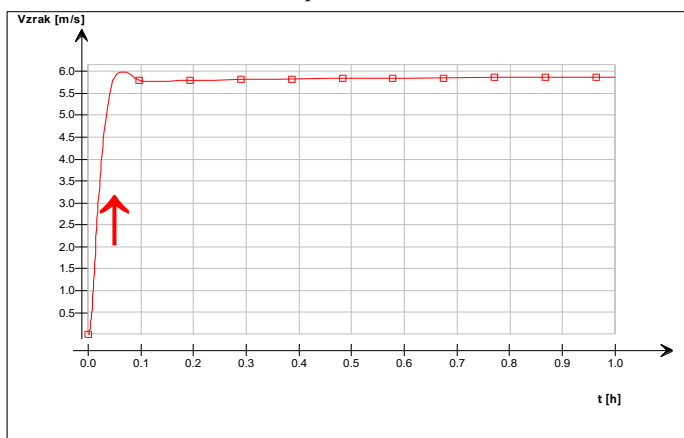
Graf 45

prikazuje spreminjanje hitrosti zraka zaradi požara po predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m.

Vključeni so vsi ventilatorji.

Hitrost zraka se bistveno poveča v območju požara, $L = 600$ m. Doseže vrednost 6 m/s.

Graf 46: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi v času $t = 180$ s



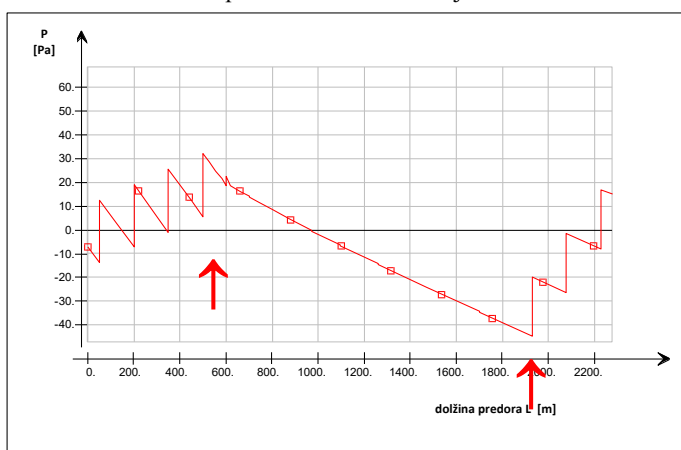
Graf 46

prikazuje hitrost zraka pri požaru v predorski cevi pri vključenih vseh ventilatorjih.

Na grafu vidimo, da v okviru predpisanih 180 sekund dosežemo hitrost zraka višjo od predpisane minimalne hitrosti 1.50 m/s, ki je dovolj visoka, da ni povratnega gibanja dima.

Burje ni.

Graf 47: Prikaz tlaka v predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m



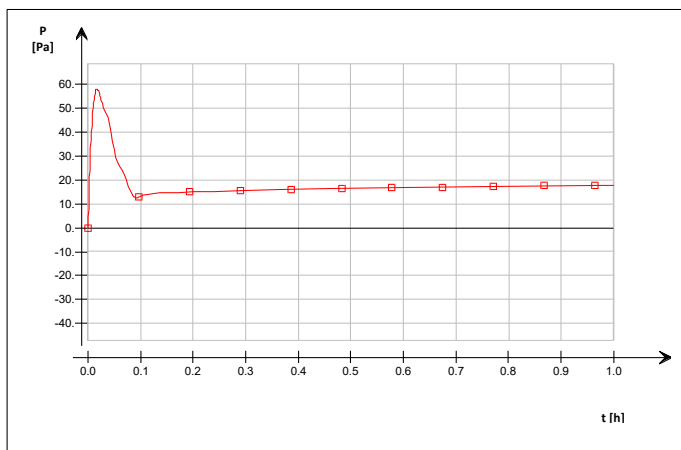
Graf 47

prikazuje potek tlaka v predorski cevi zaradi požara, na razdalji $L = 2278$ m, pri vključenih vseh ventilatorjih.

Tlaki naraščajo v območju ventilatorjev tako na vstopu kot tudi izstopu iz predorske cevi.

V območju za požarom tlak močno pade. Dvigati se začne v območju ventilatorjev pri izhodu iz predorske cevi.

Graf 48: Prikaz tlaka v predorski cevi v času $t = 6$ min



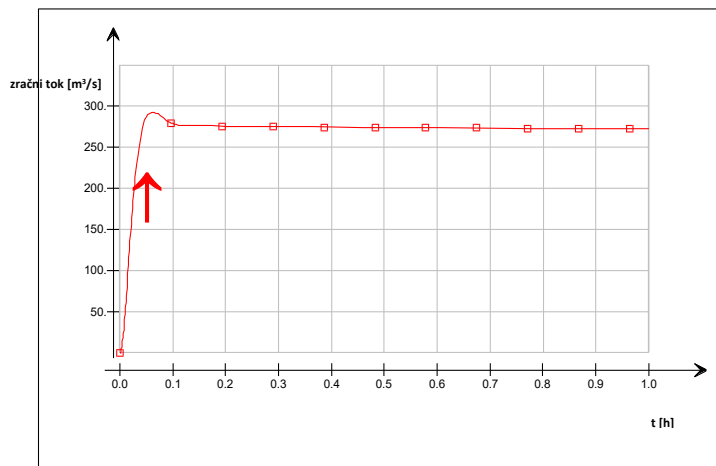
Graf 48

prikazuje potek tlaka v predorski cevi pri vključenih vseh ventilatorjih.

Tlak močno naraste v območju požara, v prvih 6 minutah.

V nadaljevanju simulacije tlak ohranja svojo velikost.

Graf 49: Prikaz zračnega toka v predorski cevi v času $t = 1$ ura



Graf 56

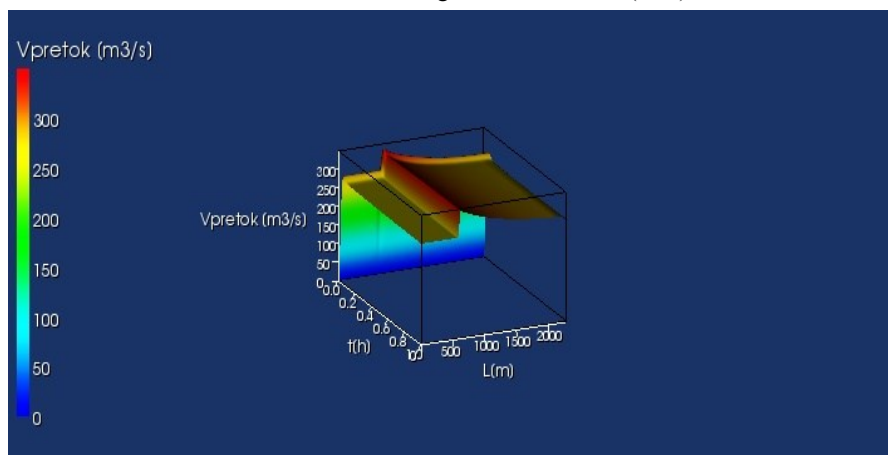
prikazuje spreminjanje zračnega toka v času $t = 1$ ura.

V prvih 6 minutah količina zraka narašča zaradi požara.

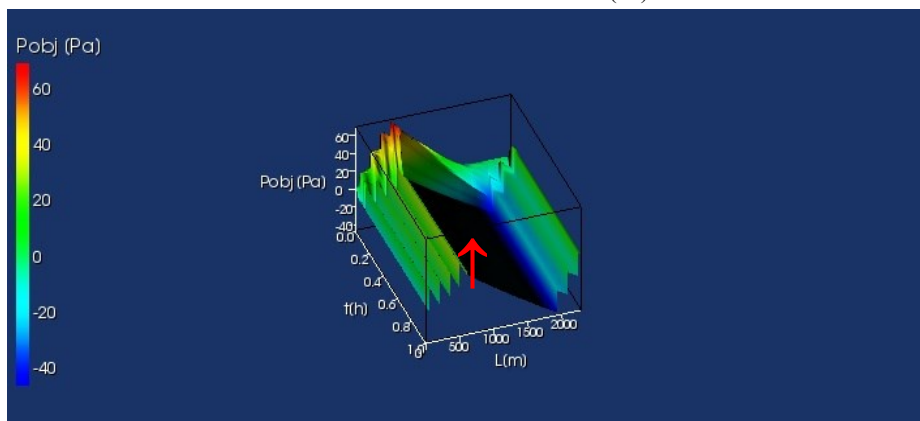
Ugotovimo lahko, da je zračni tok konstanten od 6. minute naprej do konca simulacije.

PRIKAZ DOBLJENIH VREDNOSTI S 3D DIAGRAMI:

Graf 50: Potek zračnega toka v 3D obliki (m³/s)

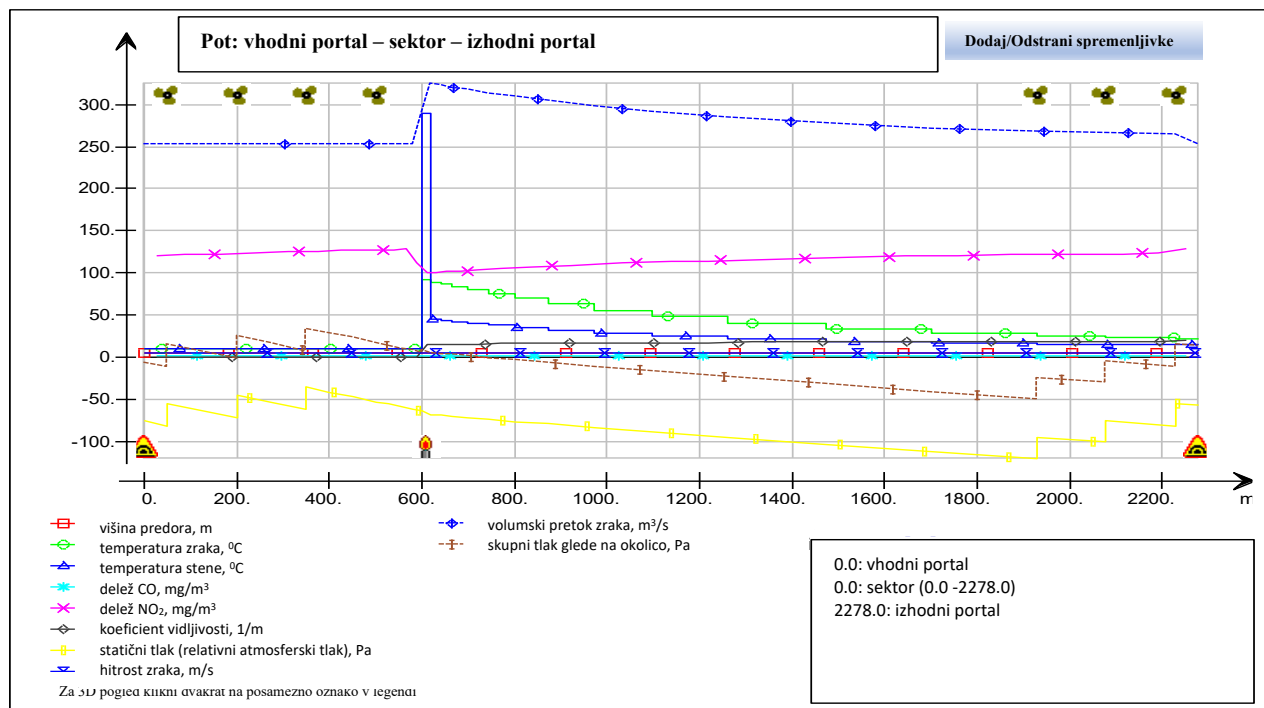


Graf 51: Potek tlaka v 3D obliki (Pa)



Scenarij 2:

Graf 52: Kastelec - vzhodna cev, požar na 600 m, vsi ventilatorji vključeni, grafični prikaz razmer pri 100 Pa



Na *Grafu 52* je prikazan v grafični obliki potek trase, potek statičnega tlaka zraka v predorski cevi, potek koncentracij CO, NO₂, ekstinkcije, potek temperatur zraka in površin.

Simulacija zajema: požar ima moč 30 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 100 Pa. Dolžina vzhodne predorske cevi je $L = 2278$ m. Čas simulacije $t = 1$ h.

6.2.2.2 PRIMERJAVA SIMULACIJ POŽAROV V VZHODNI PREDORSKI CEVI

Zbir rezultatov simulacij je podan v *Preglednici 12*. Pri simulacijah so bil upoštevane različne vrednosti jakosti vhodnega vetra – burje (*burja, burja 1, burja 2, burja 3, burja 4, burja 5*), zastoji prometa (*congestion, congestion 0, congestion 1, congestion 2, congestion 3, congestion 4, congestion 5, congestion 6*). Jakost vetra je izražena s tlaki od 0 do 500 Pa. Nadalje so upoštevani primeri, ki vključujejo vplive ventilatorjev pri različnem številu vključenih ventilatorjev (12 ali 14), pri različnih hitrostih in potiskih ventilatorjev ter ne nazadnje različne moči požara (30 ali 40 MW), med katere štejemo požare tovornih vozil, avtobusov ipd.).

Kot spremenljiv parameter so upoštevane tudi različne dolžine požarov (5 ali 10 metrov) in različne lokacije požarov (600 ali 1000 metrov) glede na razdaljo od vhoda v predorsko cev. Ugotovimo lahko, da je kljub variiranju navedenih spremenljivih parametrov, v večini primerov kritična hitrost zraka v_{krit} skoraj enaka, in se giblje okoli 2,2 m/s, kar je nad mejno

vrednostjo 1,5 m/s. To je vrednost, ki še preprečuje povratno gibanje dima, oz. s tem nastalo recirkulacijo.

Pri tlaku burje 250 Pa, vrednost kritične hitrost zraka pade pod mejno vrednost, pri delujočih 14 impulznih ventilatorjih in batnem učinku vozil v prometu s hitrostjo 50 km/h.

Vedno večja hitrost burje preusmerja tok zraka in tako vstopamo v nevarno območje, predvsem med reševanjem.

Preglednica 12: Primerjava simulacij različnih moči in lokacij požarov ter različnih hitrosti v predoru

POŽAR		burja4	Congestion6	burja 3	congestion2	congestion1	congestion3	burja2	congestion0	congestion	congestion5	burja 5	burja	burja1	congestion4
Dolžina požara		5m	5m	5m	10m	10m	5m	5m	10m	10m	10m	5m	5m	5m	10m
prezračevanje	enota	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	Vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno	vzdolžno
hitrost vozil	km/h	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
V _{burja}	Pa	0	100	200	250	300	300	320	400	400	410	500	500	500	500
ventilator	n	12	12	14	14	14	14	14	14	14	12	12	14	14	14
Požar	m	600	600	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	600
V _{vent}	m/s	30	30	35	30	30	35	35	30	30	30	30	30	35	30
Jet fans	kW	437.2	438.7	494.6	486.5	486.6	499.3	569.3	444.5	440.4	379.80	422.7	494.6	559.3	381.9
Padec tlaka****	Pa/MW	0.1	0.1	0.1	4.0	4.0	0.1	0.1	4.0	4.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
potisk _{vent}	N/kW	30	30	36	30	30	35	36	30	30	30	30	30	36	30
T _{zrak izh}	°C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
T _{stena max}	°C	626.60	644.10	646.2	604	1685	2295	683.5	598.80	578.9	544.20	706.7	621.20	628.80	451.60
P _{1 vhod}	Pa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{2 izhod}	Pa	0	100	200	250	300	300	320	400	400	410	500	500	500	500
ventilatorji*	n	12V+BE-B	12V+BE-B	14+BE-B	14V+BE-BB	14V+BE-B	14V+BE-B	14V+BE-B	14V+BE-B	14V+BE-B	12V+BE-B	12+BE-B	14+BE-B	14+BE-B	14+BE-B
P _{1 (Atm)}	Pa	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45	-57.45
P _{4 (Atm)}	Pa	-57.45	42.55	142.5	192.5	242.5	242.5	262.5	342.5	342.5	352.5	442.5	442.5	442.5	442.5
P požar	MW	30	30	30	40	40	30	30	40	40	40	40	30	30	30
V _{zrak (batni efekti) vhod}	m/s	4.426	2.838	2.674	-0.0131	-0.1293	-1.925	-1.307	-1.887	-2.445	-4.581	-5.275	-5.028	-4.205	-6.126
V _{zrak izhod} **	m/s	-4.426	-2.835	-2.669	0.01307	0.129	1.919	1.303	1.88	2.435	4.563	5.25	5.004	4.185	6.096
V _{krit}	m/s	2.208	2.208	2.208	1.278	2.072	2.244	2.207	2.369	2.369	2.37	2.369	2.207	2.207	2.207
Q _{veno}	m³/s	252.3	161.8	152.4	-0.7467	-7.373	-132.1	-78.38	-120.5	-158.9	-300	-337.2	-313.3	-262.8	-398.8
Q _{desno}	m³/s	-264.2	-168	-162.4	0.7448	7.351	109.4	74.28	107.2	138.8	260.1	299.3	285.4	238.7	347.6
Smer vhod izhod	kapaciteta do 3900 vozil, gostota prometa 103.10/km/vozni pas								kapaciteta do 4650 vozil, gostota prometa 103.1/km/vozni pas				kapaciteta do 3900 vozil, gostota prometa 103.10/km/vozni pa		
Sestava***	1000 OV, 200 TV, 40 TC														
Warning: No traffic allowed from 'Entry1' to 'Sect'. Entering traffic ignored.															

Kjer je:

- * V - ventilator, BE - batni efekt, B – burja (enačba 40)
- ** ignoriramo
- *** OV - osebna vozila, TV - tovorna vozila, TC - tovorna cisterna
- **** Padec tlaka zaradi požara – Pa/MW

Zato je treba zagotoviti ustrezne varnostne razmere, kar pomeni, da skušamo ob upoštevanju hitrosti vetra, delovanju ventilatorjev, zagotoviti take pogoje (stratifikacijo), da do (prevelikega) mešanja svežega zraka in nastalega dima pri požaru ne pride. To pomeni, da se vroči dimni plini pod stropom zadržujejo čim dlje, kar omogoči, da se lahko večina udeležencev varno umakne v sosednjo predorsko cev. Če poteka promet dvosmerno, je težavnost reševanja še bistveno večja.

V Preglednici 13 je moč videti, kakšne so vrednosti za parametre toka dima, CO in NO₂, pri različnih vrednostih tlaka vetra – burje, ki deluje na izhod vzhodne predorske cevi, oz. v smeri, ki je nasprotna smeri vožnje.

Preglednica 13: Izračunane mejne vrednosti za CO, NO₂ in dim

V burja	Pa	0	100	200	250	300	320	400	400	410	500	500	500	500
Vhod:														
Motnost toka dima	m ³ /s	0	0	0	0.003587	40.04	5523	7780	7898	7916	7690	5579	5605	5878
CO	mg/s	0	0	0	48.08	489.9	512.1	1365	1391	1785	544.7	527.2	529.5	1352
NO ₂	µg/s	0	0	0	1470	14839	38062	40723	41487	417557	40489	39183	39359	522192
Sektor:					Nevarno! glej ogenj!	Nevarno! glej ogenj!								
Motnost toka dima	m ³ /s	19.67	30.71	32.61	763	598.6	69.21	62.26	47.7	25.34	22.00	17.31	20.71	14.2
CO	mg/s	1.053	1.643	2.958	70.17	67.8	6.322	10.77	8.284	5.657	1.536	1.612	1928	3.222
NO ₂	µg/s	78.26	122.1	219.9	2085	2038	469.9	321.4	247.1	1335	114.2	119.8	143.3	1260
izhod:														
Motnost toka dima	m ³ /s	5280	5232	5473	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	mg/s	282.7	279.9	496.5	0	0	0	0	0	-352.2	0	0	0	-438
NO ₂	µg/s	21010	20803	36902	0	0	0	0	0	-313715	0	0	0	-419157

Računsko je dokazano, da obstaja visoka nevarnost neuspešnega usmerjanja požara v primeru burje pri 250 in 300 Pa, moči požara 40 MW in dolžini ognja 5 in 10 m, ker je nemogoče doseči kritične vrednosti parametrov.

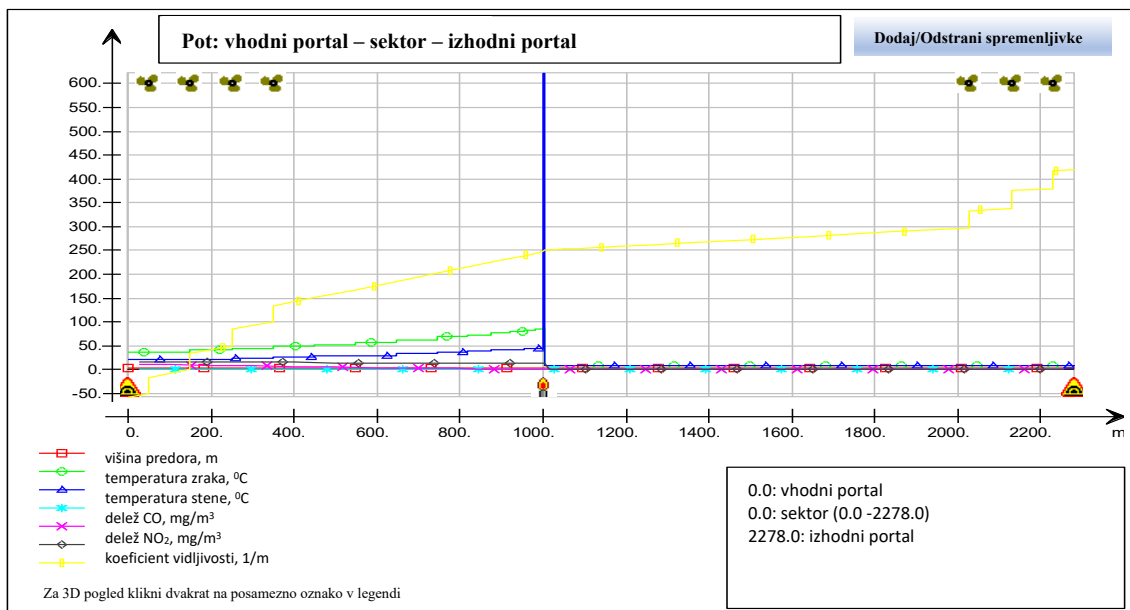
Operater zapre predor, ko hitrost vetra preseže 30 m/s!

Scenarij 1:

Na Grafu 53 je prikazan grafični višinski potek trase, potek statičnega tlaka, potek koncentracij CO, NO₂, ekstinkcije, poteka temperatur zraka in površin (glej legendo burja).

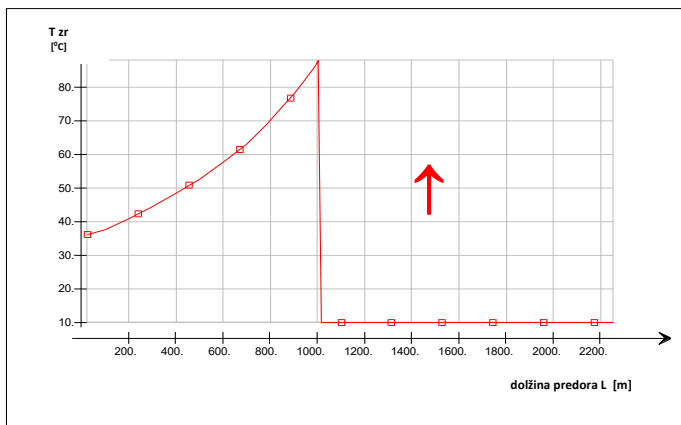
Simulacija zajema: moč požara je 30 MW, lokacija 1000 m od vhodnega portala, vključeni vsi ventilatorji, delujejo pri normalni moči 30 kW, hitrost burje 500 Pa. Dolžina vzhodne predorske cevi je L = 2278 m. Čas simulacije t = 1 h. Batnega efekta ni.

Graf 53: vzhodna cev, vzdolžno prezračevanje, požar 1000m, vsi ventilatorji vključeni, grafični prikaz razmer pri 500Pa



Kastelec
burja

Graf 54: Prikaz temperature zraka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



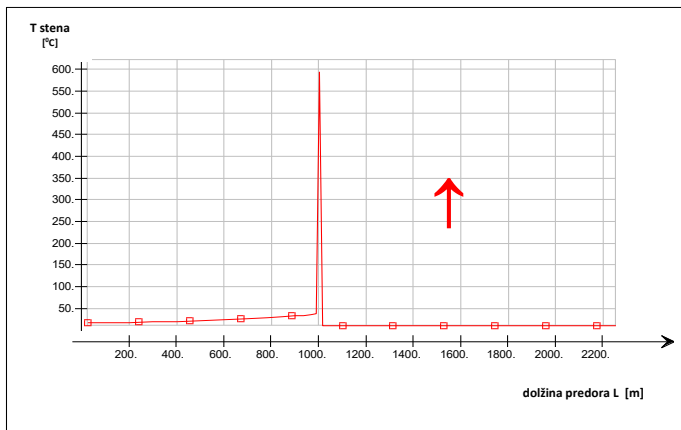
Na Grafu 54

je prikazana temperatura zraka T_{zrak} . Vidimo, da je na primarni strani, na razdalji od vhoda v predorsko cev do požara porast temperature preko 90°C , zaradi povratnega toka, ki je posledica premočne burje.

Vpliv zelo močne burje se kaže tudi v območju za požarom, saj se temperatura zraka takoj zniža na 10°C .

Predor je potrebno pri tako močni burji zapreti takoj!

Graf 55: Prikaz temperature stene v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



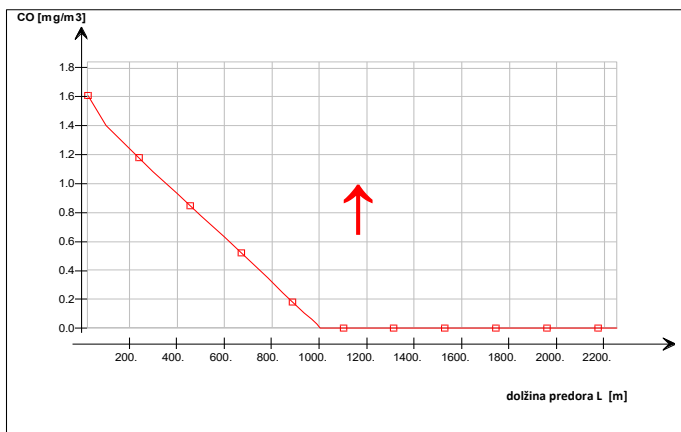
Na Grafu 55

lahko iz prikaza temperature stene vidimo, da se ta v območju požara, $L = 1000$ m, močno poveča.

Doseže lahko tudi 600°C .

Tako na primarni kot sekundarni strani predorske cevi, se zaradi močne burje stene hitreje ohladijo.

Graf 56: Prikaz poteka vrednosti CO v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



Graf 56

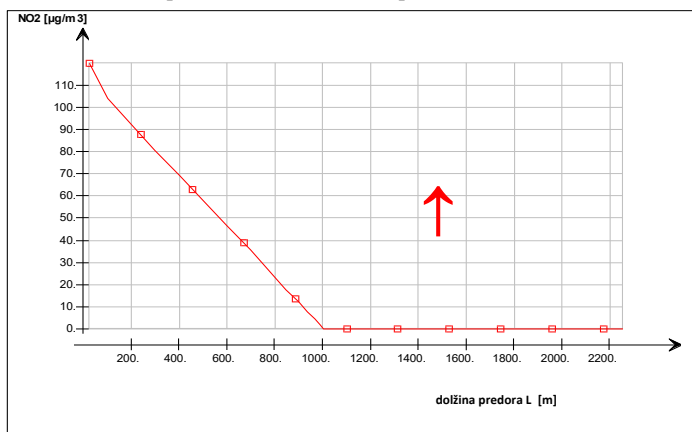
prikazuje potek koncentracije CO v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m.

Zaradi burje pride do povratnega toka CO.

Na primarni strani lahko vidimo povečane količine CO v smeri od požara proti vstopu v predor.

Vključeni so vsi ventilatorji. Burja je močnejša, zato je potrebno predor takoj zapreti.

Graf 57: Prikaz poteka vrednosti NO₂ v predorski cevi na dolžini L = 2278 m



Graf 57

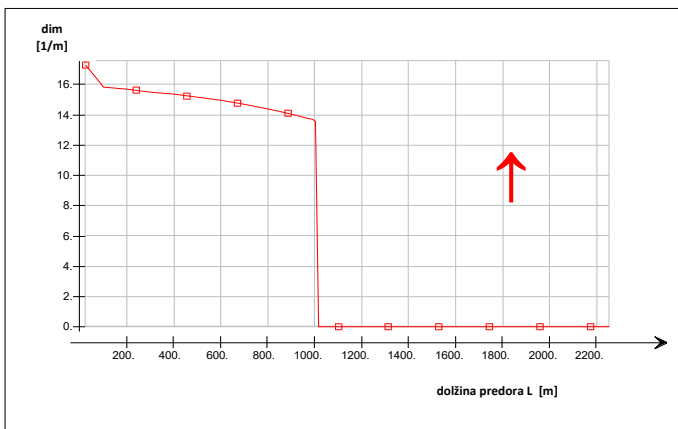
prikazuje potek koncentracije NO₂ v predorski cevi na dolžini L = 2278 m.

Podobno kot pri CO, tudi NO₂ potuje v smeri od požara proti vstopu v predor, zaradi premočne burje.

Povratni tok NO₂.

Vključeni so vsi ventilatorji. Burja je močnejša.

Graf 58: Prikaz poteka ekstinkcije v predorski cevi na dolžini L = 2278 m



Graf 58

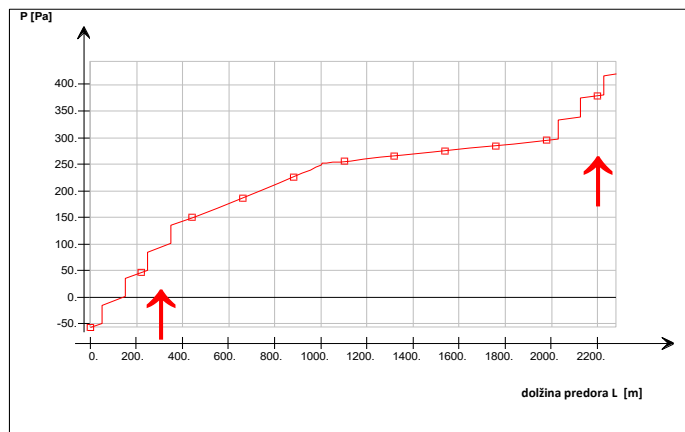
prikazuje potek koncentracije dima (ekstinkcije) v predorski cevi.

Vrednost v primarnem delu pred požarom je močno povečana, saj je burja močnejša od ventilatorjev.

Dim potuje nazaj proti vходу predora.

Povratni tok dima.

Graf 59: Prikaz poteka tlaka v predorski cevi na dolžini L = 2278 m



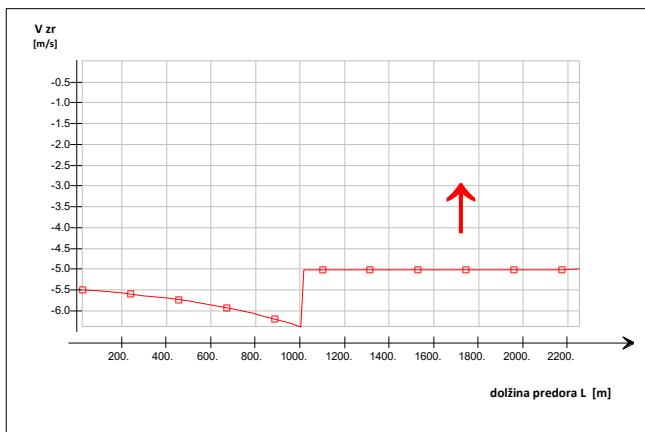
Graf 59

prikazuje potek tlaka v vzhodni predorski cevi na razdalji L = 2278 m.

Tlak hitro narašča v območju ventilatorjev. Priključeni so vsi ventilatorji.

V območju za požarom, L = 1000 m, tlak naraste.

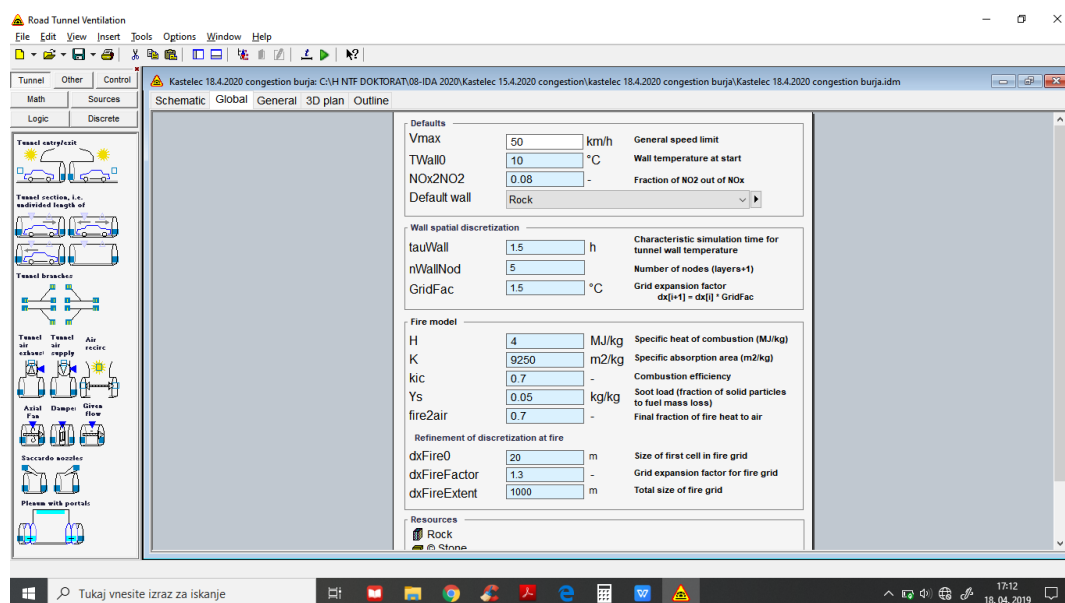
Graf 60: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



Graf 60

prikazuje hitrost zraka v vzhodni predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m.

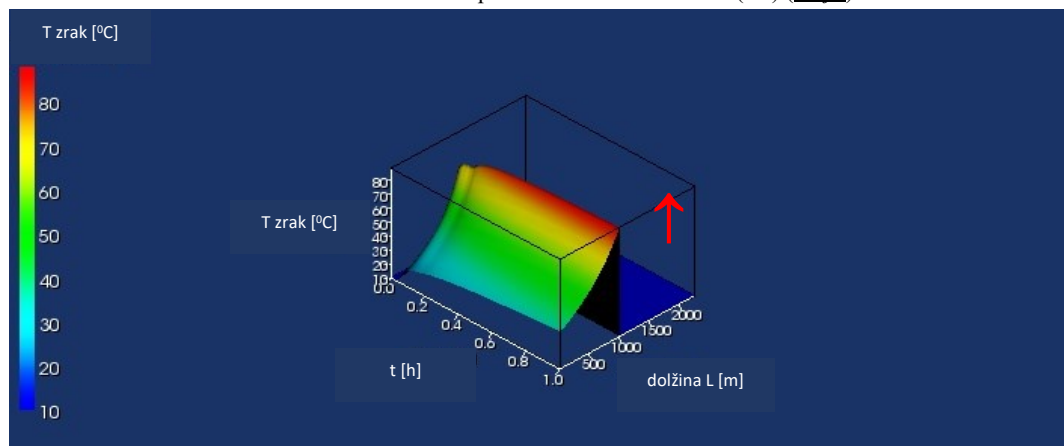
Ugotovimo lahko, da je hitrost zraka zaradi premočne burje obrnjena v nasprotno smer, ima negativni predznak.



Slika 24: Izračun s pomočjo programa IDA RTV – vnos parametrov (burja)

PRIKAZ DOBLJENIH VREDNOSTI S 3D DIAGRAMI

Graf 61: Potek temperature zraka v 3D obliki ($^{\circ}\text{C}$) (*burja*)



Scenarij 2:

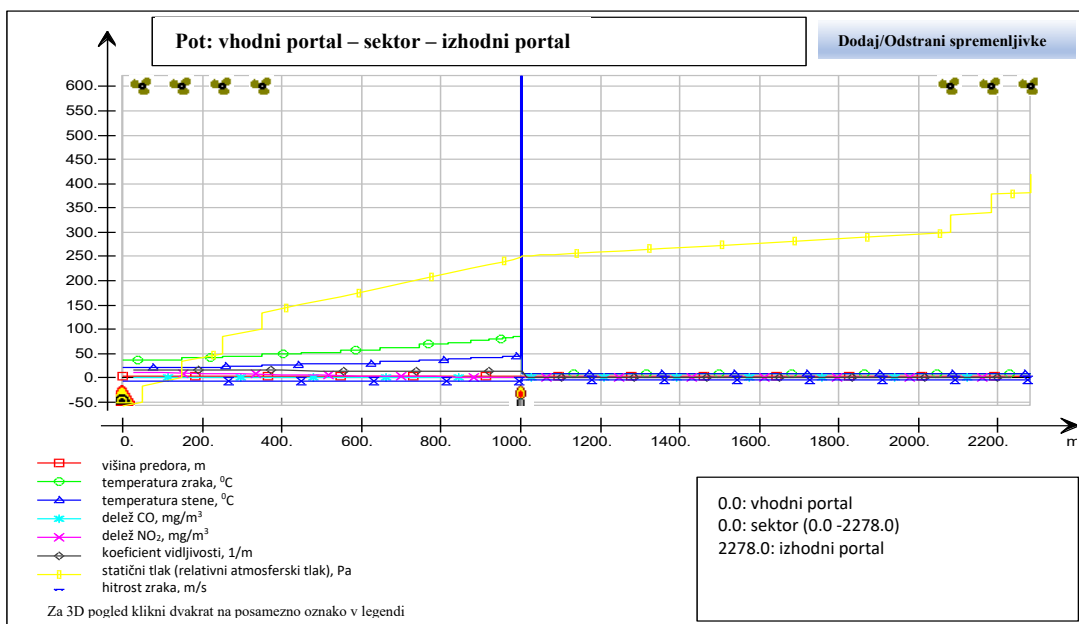
Razlika med *burjo* in *burjo 1* je v maksimalni hitrosti ventilatorjev, v potisku ventilatorjev, s tem večjo porabo energije. Batnega efekta ni.

Temperatura sten ni bistveno višja, kritična hitrost zraka pa je enaka.

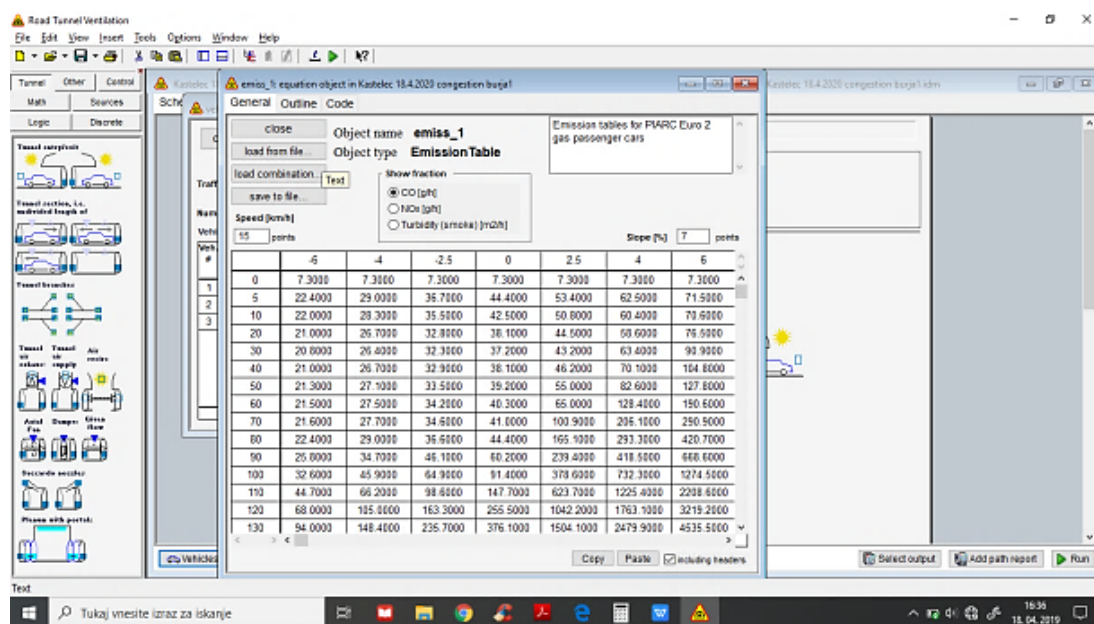
Simulacija zajema: požar ima moč 30 MW, vključeni so vsi ventilatorji, povečana je moč ventilatorjev na 35 kW, moč burje je 500 Pa.

Dolžina vzhodne predorske cevi je $L = 2278$ m. Čas simulacije $t = 1$ h.

Graf 62: Kastelec - vzhodna cev, vzdolžno prezračevanje, **požar, vsi ventilatorji vključeni**, prikaz razmer pri 500 Pa

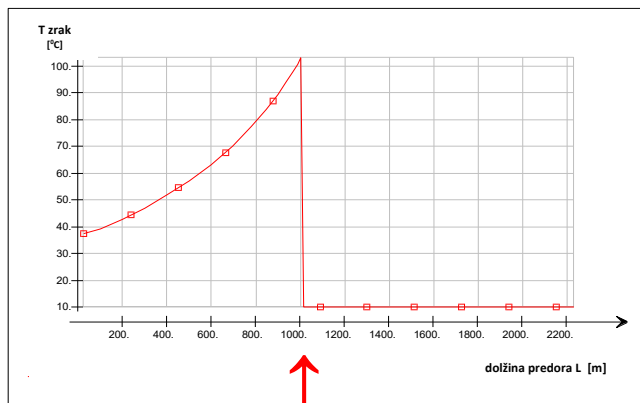


Kastelec burja 1, dolžina požara je 5m



Slika 25: Izračun s pomočjo programa IDA RTV – preglednica emisij za CO (burja1)

Graf 63: Prikaz poteka temperature zraka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



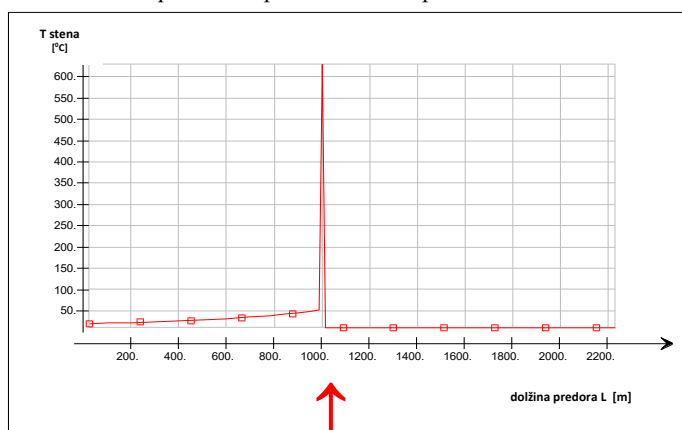
Na Grafu 63

je prikazana temperatura zraka T_{zrak} . Vidimo, da je na primarni strani, na razdalji od vhoda v predorsko cev do požara porast temperature preko $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, zaradi povratnega toka, ki je posledica premočne burje.

Vpliv zelo močne burje se kaže tudi v območju za požarom, saj se temperatura zraka takoj zniža na $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Predor je potrebno pri tako močni burji zapreti takoj!

Graf 64: Prikaz poteka temperature stene v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



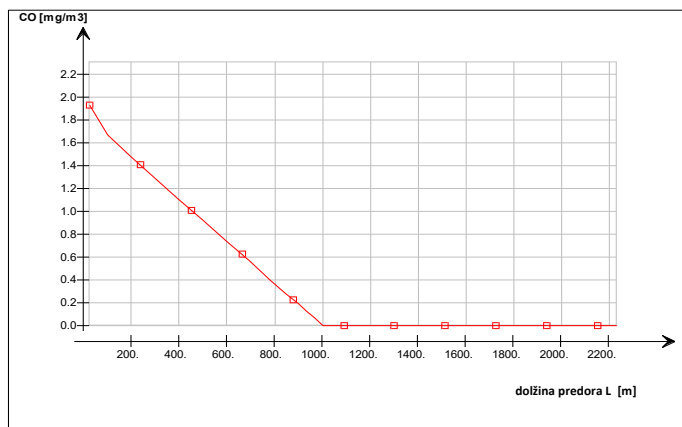
Na Grafu 64

lahko iz prikaza temperature stene vidimo, da se ta v območju požara, $L = 1000$ m, močno poveča.

Temperatura doseže lahko tudi več kot $600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tako na primarni kot sekundarni strani predorske cevi, se zaradi močne burje stene hitreje ohladijo.

Graf 65: Prikaz poteka koncentracije CO v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



Graf 65

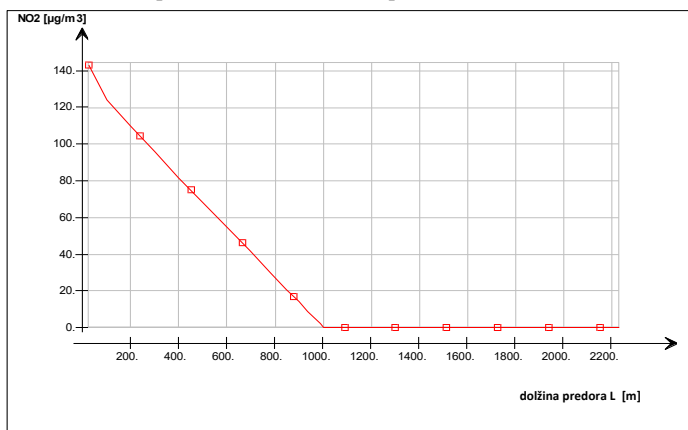
prikazuje potek koncentracije CO v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m.

Zaradi burje pride do povratnega toka CO.

Na primarni strani lahko vidimo povečane količine CO v smeri od požara proti vstopu v predor.

Vključeni so vsi ventilatorji. Burja je močnejša, zato je potrebno predor takoj zapreti.

Graf 66: Prikaz poteka vrednosti NO₂ v predorski cevi na dolžini L = 2278 m



Graf 66

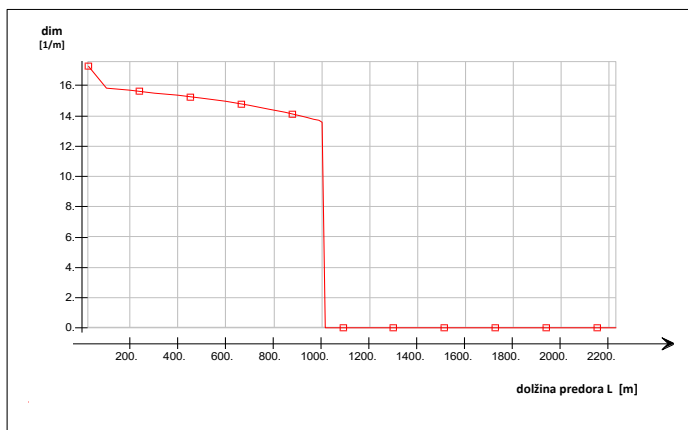
prikazuje potek koncentracije NO₂ v predorski cevi na dolžini L = 2278 m.

Podobno kot pri CO, tudi NO₂ potuje v smeri od požara proti vstopu v predor, zaradi premočne burje.

Povratni tok NO₂.

Vključeni so vsi ventilatorji. Burja je močnejša.

Graf 67: Prikaz poteka ekstinkcije v predorski cevi na dolžini L = 2278 m



Graf 67

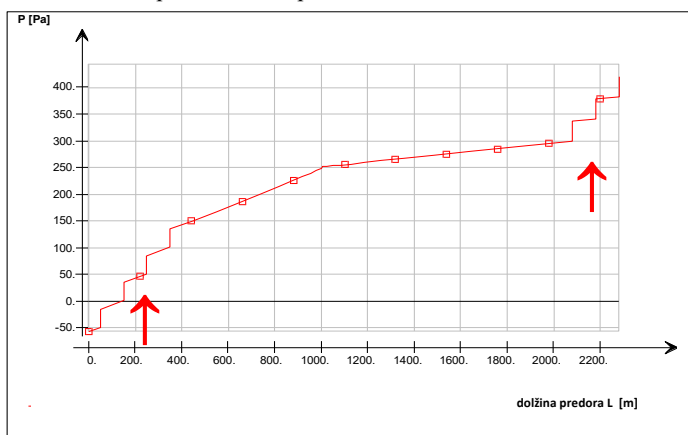
prikazuje potek koncentracije dima (ekstinkcije) v predorski cevi.

Vrednost v primarnem delu pred požarom je močno povečana, saj je burja močnejša od ventilatorjev.

Dim potuje nazaj proti vhodu predora.

Povratni tok dima.

Graf 68: Prikaz poteka tlaka v predorski cevi na dolžini L = 2278 m



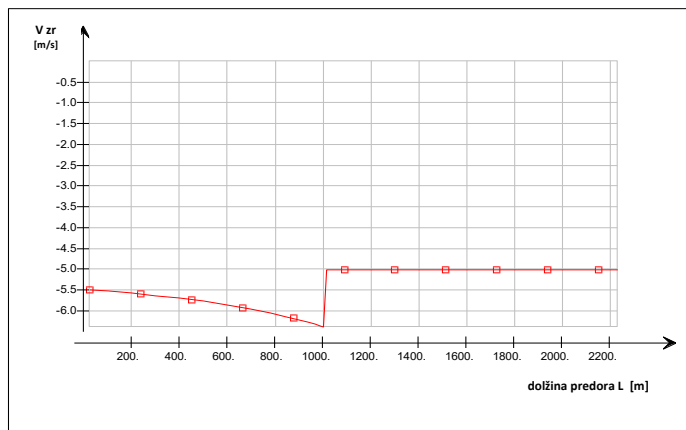
Graf 68

prikazuje potek tlaka v vzhodni predorski cevi na razdalji L = 2278 m.

Tlak hitro narašča v območju ventilatorjev. Priključeni so vsi ventilatorji.

V območju za požarom, L = 1000 m, tlak naraste.

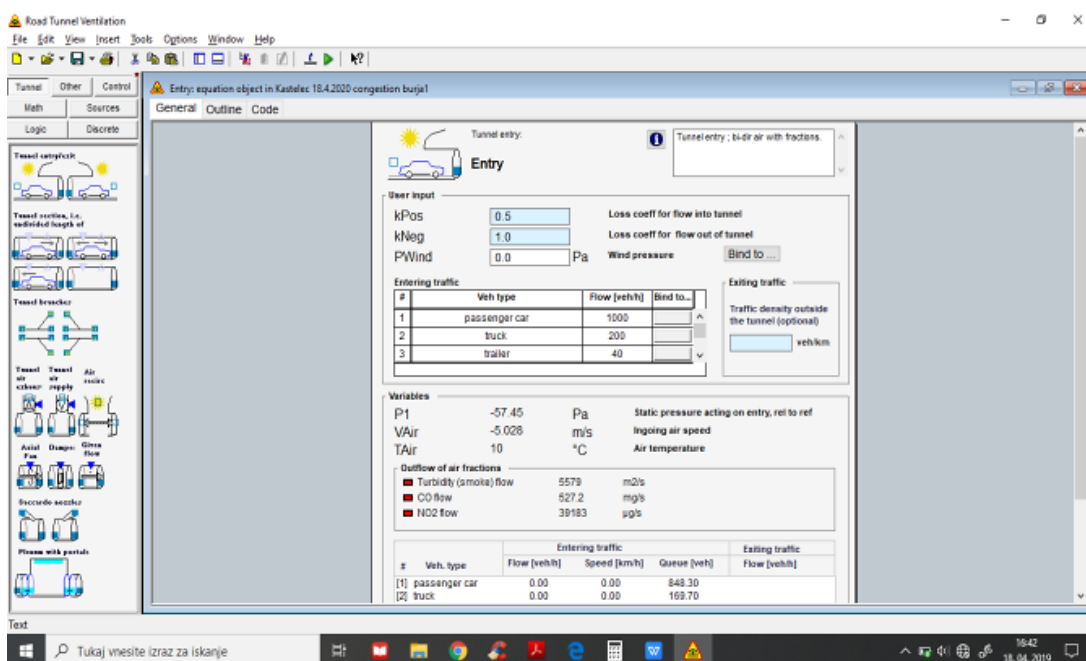
Graf 69: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



Graf 69

prikazuje hitrost zraka v vzhodni predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m.

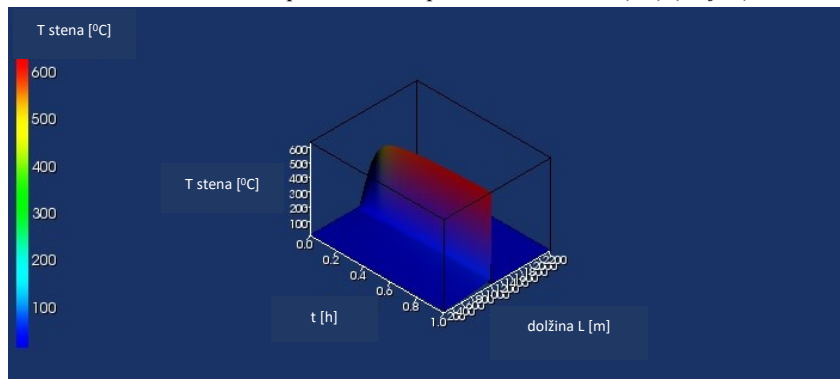
Ugotovimo lahko, da je hitrost zraka zaradi premočne burje obrnjena v nasprotno smer, ima negativni predznak.



Slika 26: Izračun s pomočjo programa IDA RTV - vhodni portal (burja1)

PRIKAZ DOBLJENIH VRDNOSTI S 3D DIAGRAMI

Graf 70: Potek temperature stene predora v 3D obliki (°C) (*burja1*)

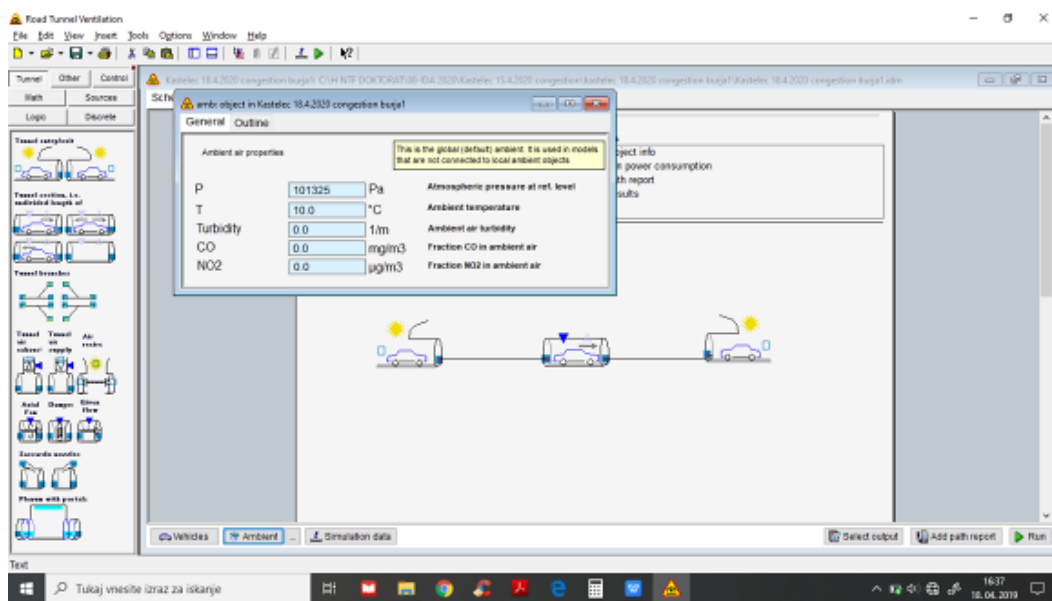


Ko piha burja iz ljubljanske smeri proti izhodnemu portalu vzhodne predorske cevi Kastelec v območju 250 do 500 Pa, lahko opazimo na vseh slikah, da so v sekundarnem območju, to je območje za požarom v smeri proti Ljubljani, vse vrednosti nizke in konstantne. To pomeni, da je burja močnejša od ventilatorjev in sili vse emisije na ti. primarno stran, to je stran pred požarom, oz. stran, kjer pride do zastojev, kar je lahko zelo nevarno za vse udeležence. Pojavi se povratni tok. Predviden potreben čas za varno reševanje $t = 8$ minut ni več zagotovljen!

Primarna stran bi morala biti zavarovana tako, da ne bi prihajalo do ti. povratnega toka, saj vozila mirujejo in se morajo udeleženci v prometu čim prej umakniti na varno, šele po tem se vklopijo vsi ventilatorji. Hitrost burje lahko zelo otežuje odvod dimnih plinov iz predora.

Med variantama *burja* in *burja 1*, 500 Pa, kljub večji hitrosti in potisku ventilatorjev, ni opaziti posebnih razlik v rezultatih in diagramih/tabelah. Praksa je taka, da moramo že pri nižjih tlakih, od 200 Pa navzgor, predore zapreti za ves promet. S tem se prepreči morebitne hude posledice v primeru prometne nesreče s požarom.

Pretok zraka na primarni strani ima pri velikih močeh burje (250, 300, 400, 500 Pa) negativen predznak, saj burja preusmeri tok v nasprotno smer. Zato tudi v primeru brez požara, a z močnimi sunki burje, **skladno z RVS predpisi, predor zapremo!**

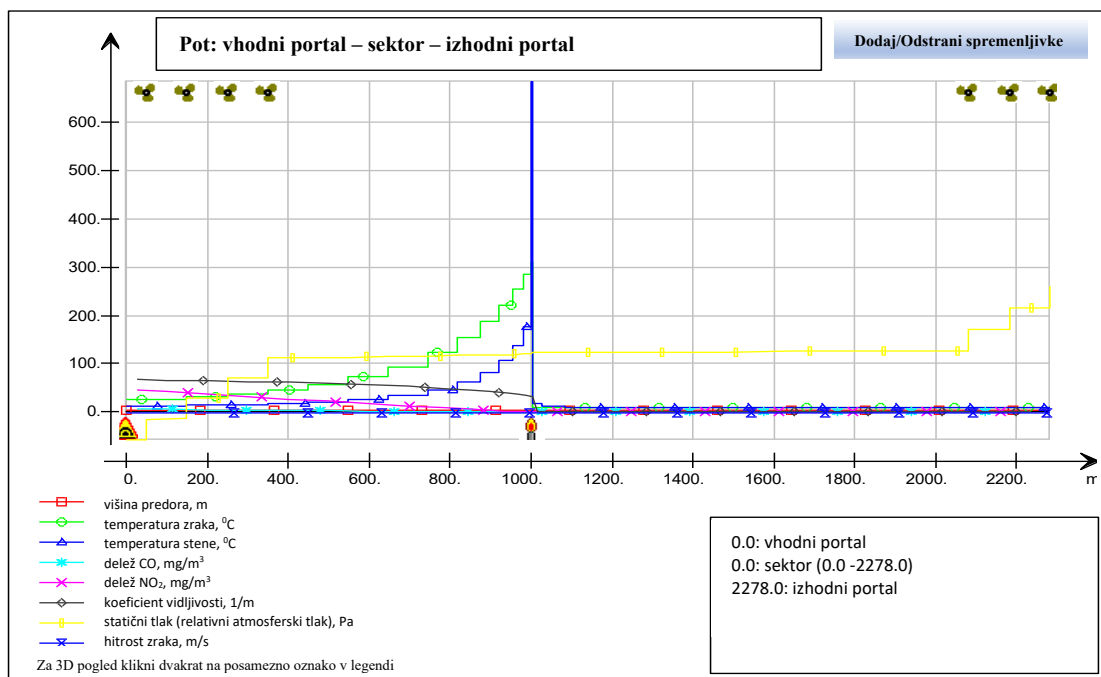


Slika 27: Določitev mejnih vrednosti s pomočjo programa IDA RTV (burja1)

Scenarij 3:

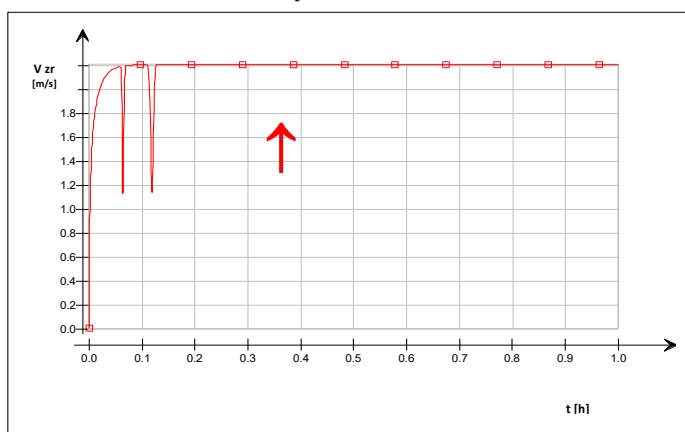
- Maksimalna hitrost zraka in potisk vseh ventilatorjev povzročata večjo porabo energije
- Temperatura sten v tem primeru ni bistveno višja, kritična hitrost zraka pa je konstantna
- Požar ima moč 30 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 320 Pa
- Kljub visoki $v_{krit} = 2,2$ m/s, na primarni strani veliko dima, NO_2 in CO, zaradi burje
- Po višini tlaka lahko sklepamo, da je burja zelo močna, oz. njena hitrost prevelika
- Dolžina požara je 5 m. Ventilatorji proizvajajo maksimalno hitrost zraka in potisk.

Graf 71: Kastelec - vzhodna cev, vzdolžno prezračevanje, požar, vsi ventilatorji vključeni, prikaz razmer pri 320 Pa



Kastelec burja 2

Graf 72: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi v času $t = 1$ ura



Graf 72

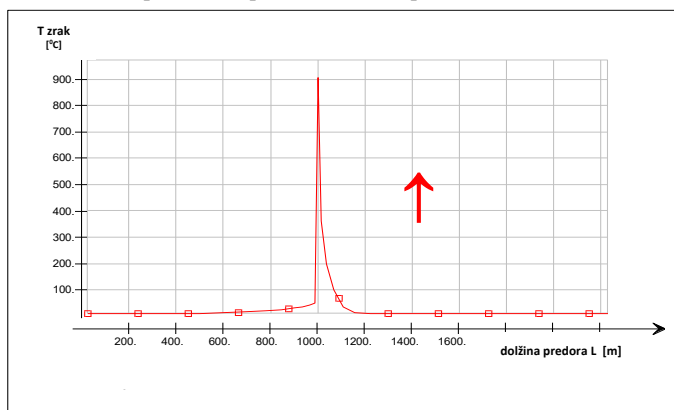
prikazuje potek hitrost zraka v predorski cevi pri vključenih vseh ventilatorjih, v času 1 ure.

Na grafu je prikazano, da kritična hitrost zaradi vpliva burje v času 8 minut dvakrat pade pod mejno vrednost.

V nadaljevanju sicer dosežemo hitrost zraka višjo od predpisane minimalne hitrosti 1.50 m/s.

Kljub temu se zaradi močnih sunkov burje pojavi povratno gibanje dima.

Graf 73: Prikaz poteka temperature zraka v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



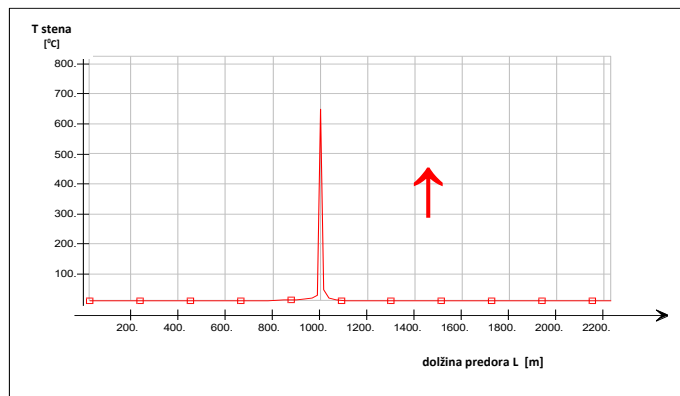
Na Grafu 73

je prikazana temperatura zraka T_{zrak} na razdalji $L = 2278$ m.

Vidimo, da je v območju požara, na razdalji 1000 m, porast temperature preko 900 °C.

Vpliv zelo močne burje se kaže v območju pred in za požarom.

Graf 74: Prikaz temperature stene v predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m



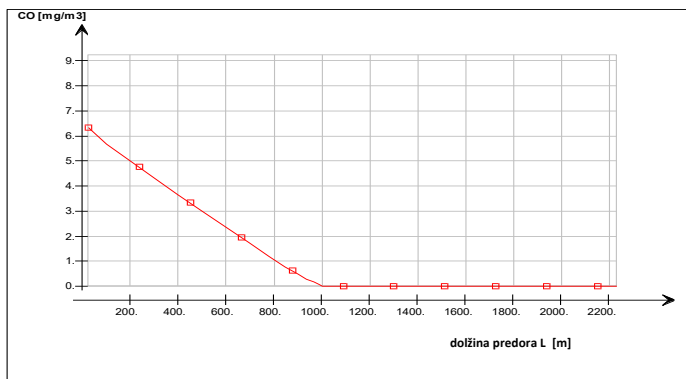
Na Grafu 74

lahko iz prikaza temperature stene vidimo, da se ta v območju požara, $L = 1000$ m, močno poveča.

Doseže lahko tudi več kot 600°C , potem pa se proti izhodu iz predorske cevi spet ohladi.

Ob tako močni burji mora biti predor zaprt, oz. operater ne sme dopustiti da bi se v njem odvijal promet. V primeru neseče startifikacije in s tem možnosti za umik udeležencev ne bi bilo.

Graf 75: Prikaz poteka vrednosti CO v predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m



Graf 75

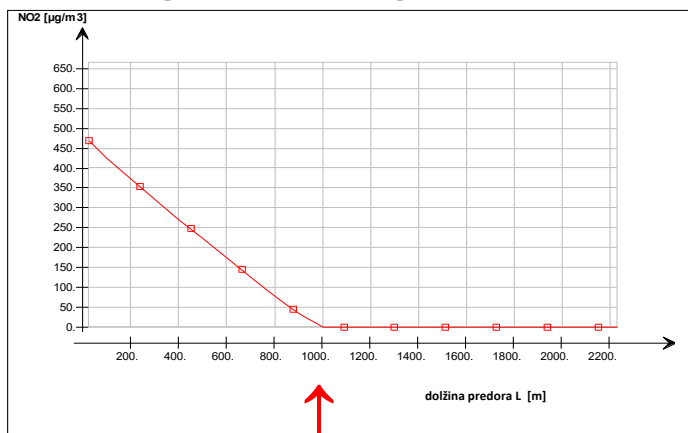
prikazuje potek koncentracije CO v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m.

Zaradi burje pride do povratnega toka CO.

Na primarni strani lahko vidimo povečane količine CO od požara proti vstopu v predor.

Vključeni so vsi ventilatorji. Burja je močnejša, zato je potrebno predor takoj zapreti.

Graf 76: Prikaz poteka vrednosti NO_2 v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



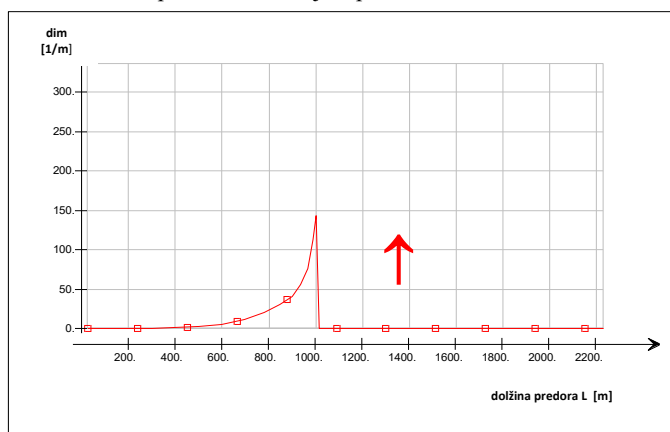
Graf 76

prikazuje potek koncentracije NO_2 v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m.

Podobno kot pri CO, tudi NO_2 potuje od požara proti vstopu v predor, zaradi premočne burje. Povratni tok.

Vključeni so vsi ventilatorji. Burja je močnejša.

Graf 77: Prikaz poteka ekstinkcije v predorski cevi na dolžini $L = 2278$ m



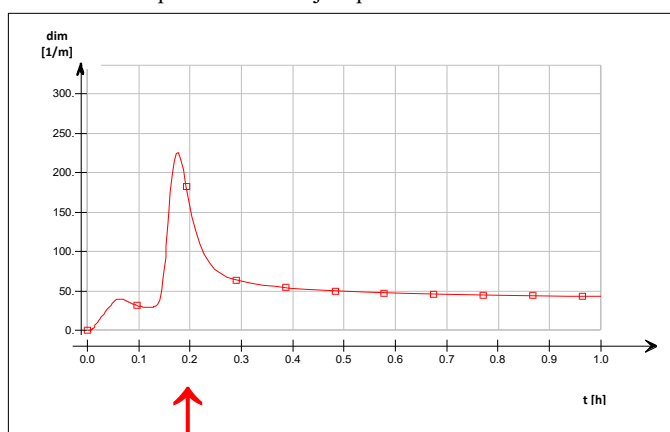
Graf 77

prikazuje potek koncentracije dima (ekstinkcije) v predorski cevi.

Koncentracija dima v primarnem delu pred požarom kot tudi v sekundarnem delu za požarom je približno enaka. Poveča se v območju požara.

Dim potuje nazaj proti vhodu predora. Delni povratni tok dima v območju 600 do 1000 metrov.

Graf 78: Prikaz poteka ekstinkcije v predorski cevi v času $t = 1$ ura



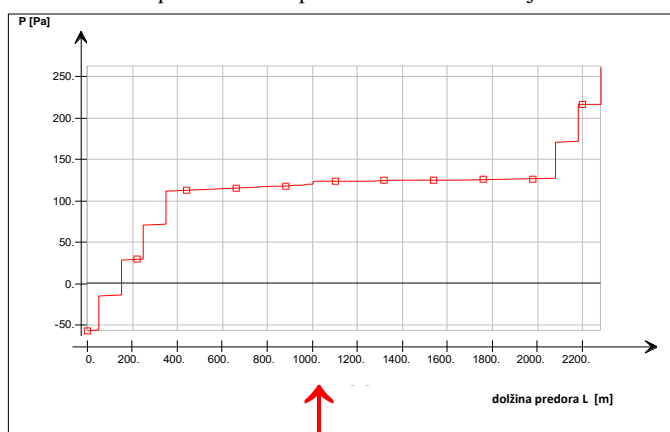
Graf 78

prikazuje potek koncentracije dima (ekstinkcije) v predorski cevi, v dolžini $L = 2278$ m.

Vrednost koncentracije dima se v območju požara močno poveča, za požarom pa se zniža, potem pa ostane do konca predorske cevi skoraj enaka.

Vpliv burje je zelo velik.

Graf 79: Prikaz poteka tlaka v predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m



Graf 79

prikazuje potek tlaka v predorski cevi pri vključenih vseh ventilatorjih.

Tlak močneje narašča v območju ventilatorjev.

V območju pred in za požarom tlak ostane na isti ravni.

Graf 80: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m



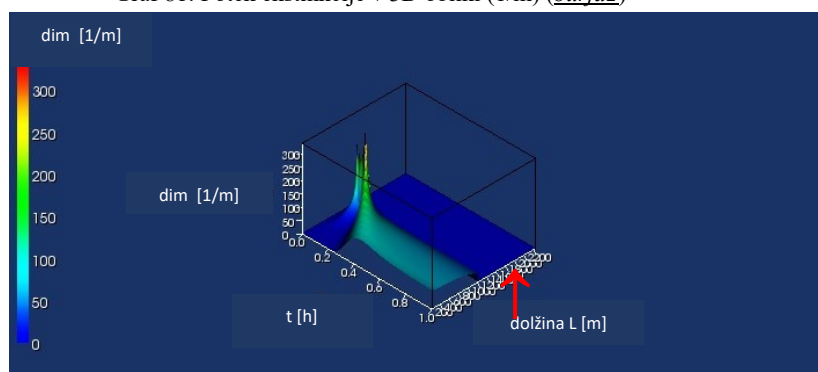
Graf 80

prikazuje hitrost zraka v predorski cevi na razdalji $L = 2278$ m.

Ugotovimo lahko, da pred požarom hitrost zraka močno upade, in v območju med 400 in 1000 m ne dosega predpisane vrednosti 1.5 m/s.

PRIKAZ DOBLJENIH VREDNOSTI S 3D DIAGRAMI

Graf 81: Potek ekstinkcije v 3D obliki (1/m) (*burja2*)



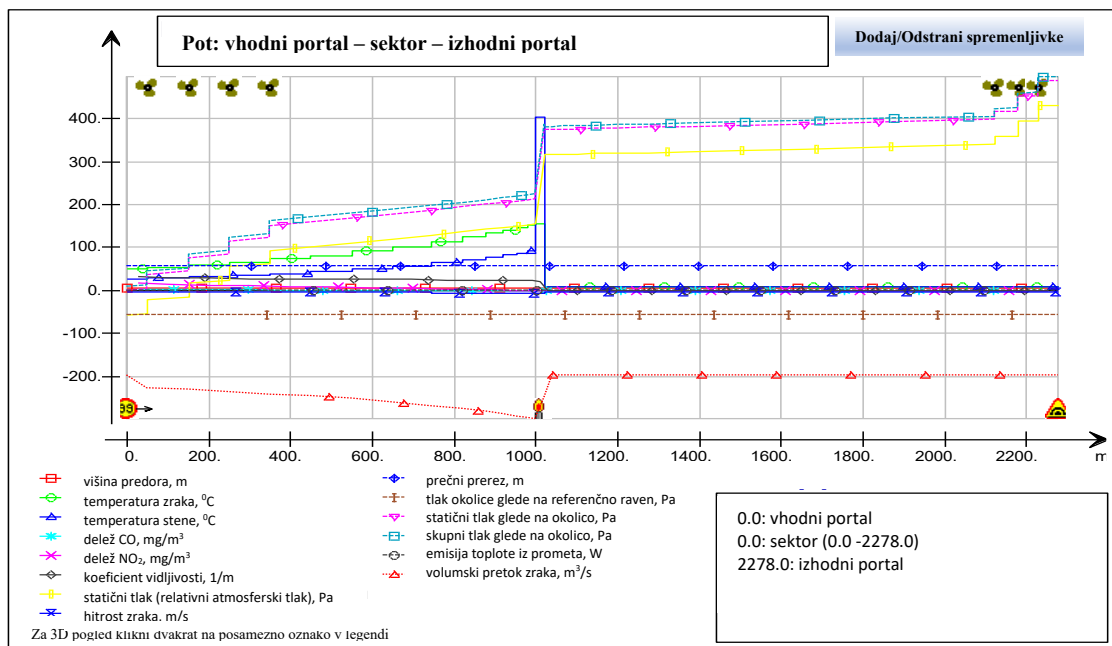
Scenarij 4:

Scenarij zajema:

- Vključenih je 12 ventilatorjev, s tem nižja poraba energije
- Temperatura sten ni bistveno višja, kritična hitrost zraka pa je enaka
- Požar ima moč 40 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 500 Pa
- Dolžina vzhodne predorske cevi je $L = 2278$ m
- Čas simulacije $t = 1$ ura.

Rezultati *scenarija 4* in *scenarija 5* so podobni, kot pri *scenariju 1* in *scenariju 2*, kjer je burja močnejša od ventilatorjev in se tok zraka obrne v primarno smer, pride do povratnega toka, kar pomeni, da je potrebno predor zapreti, ker s prezračevanjem ne moremo zagotoviti varnih razmer za umik vseh udeležencev ($t < 8$ min).

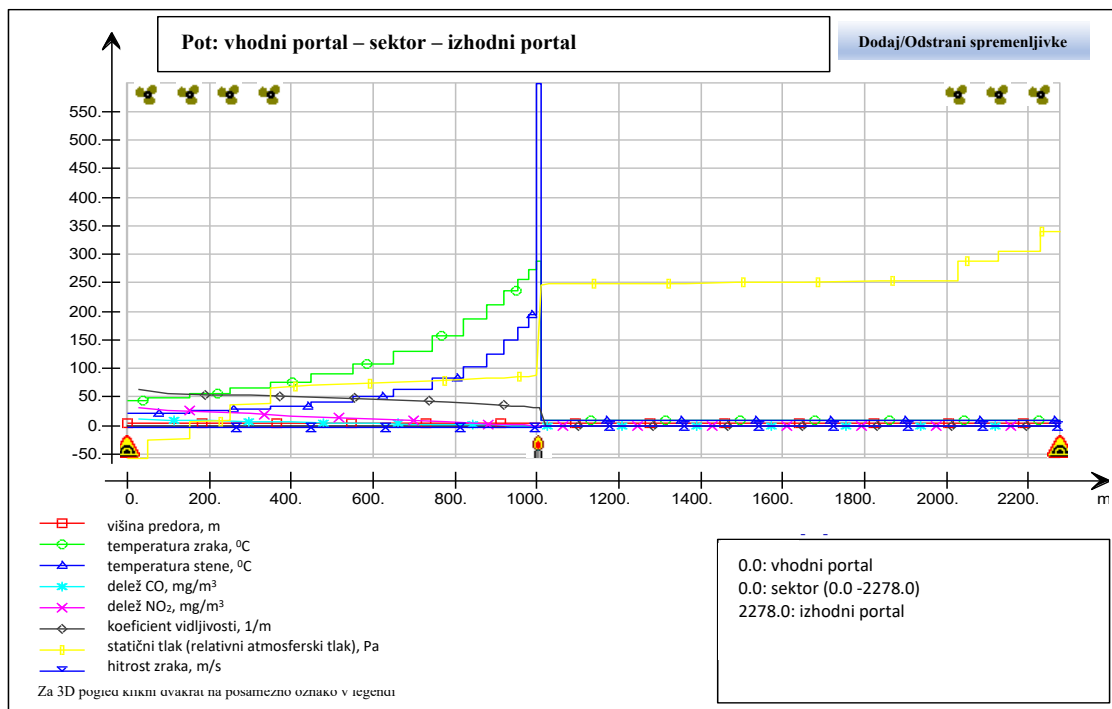
Graf 82: Kastelec - vzhodna cev, vzdolžno prezračevanje, požar 40 MW, 12 ventilatorjev, prikaz razmer pri 500 Pa



burja 5

Scenarij 5:

Graf 83: Kastelec - vzhodna cev, vzdolžno prezračevanje, požar 40 MW, 14 ventilatorjev, prikaz razmer pri 400 Pa



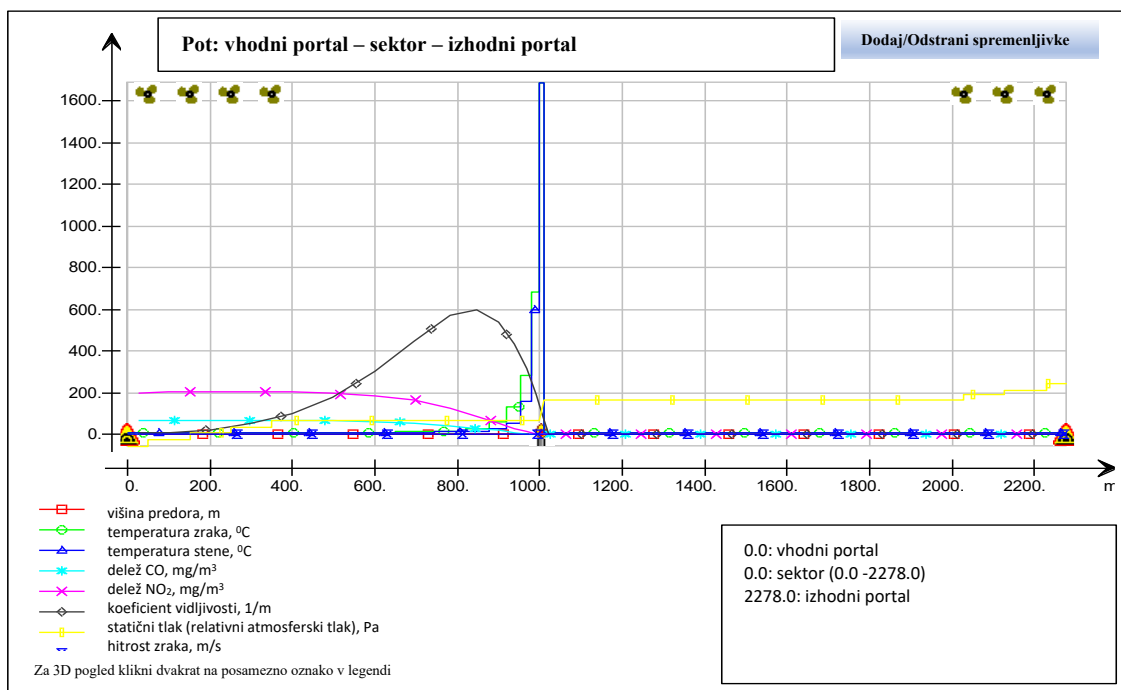
congestion0

Podatki so naslednji:

- Vključenih je 14 ventilatorjev, s tem višja poraba energije
- Temperatura sten ni bistveno višja, kritična hitrost zraka je nad 1.5 m/s
- Dolžina požara je 10 metrov. Požar ima moč 40 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 400 Pa. Dolžina vzhodne predorske cevi je $L = 2278$ m.

Scenarij 6:

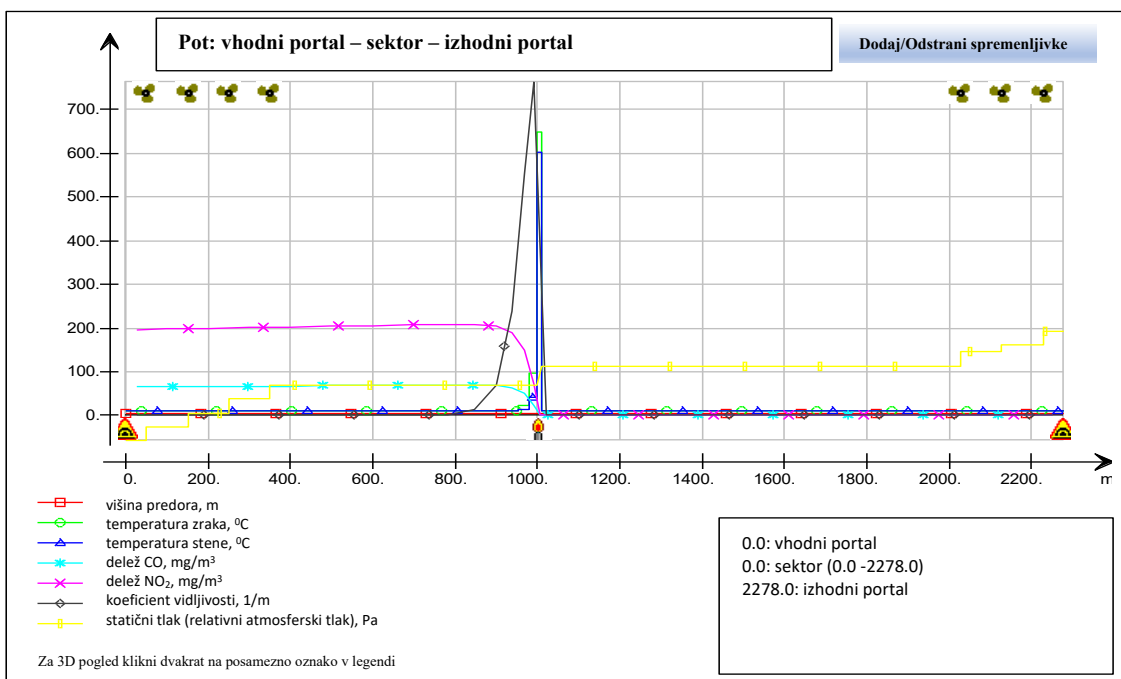
Graf 84: Kastelec - vzhodna cev, vzdolžno prezračevanje, požar 40 MW, 14 ventilatorjev, prikaz razmer pri 300 Pa



congestion1

Scenarij 7:

Graf 85: Kastelec - vzhodna cev, vzdolžno prezračevanje, požar 40 MW, 14 ventilatorjev, prikaz razmer pri 250 Pa



congestion 2

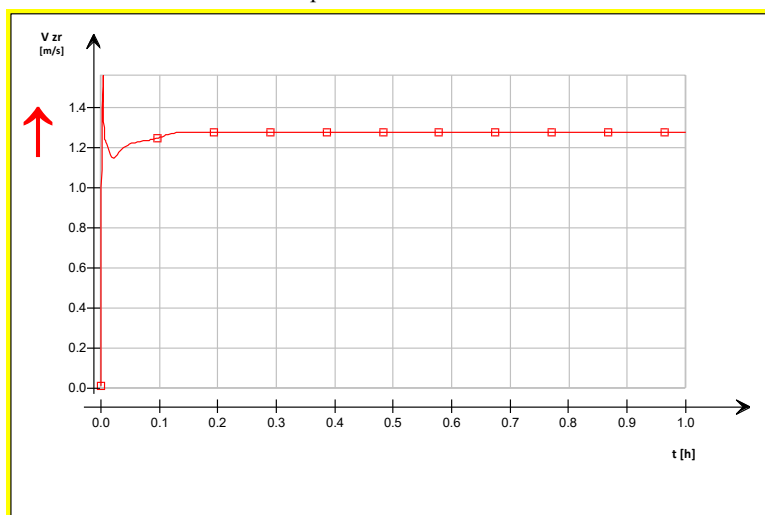
Scenarij 6 zajema:

- Vključenih je 14 ventilatorjev, s tem višja poraba energije
- Dolžina požara je 10 m
- Temperatura sten ni bistveno višja, kritična hitrost zraka je nad 1.5 m/s
- Požar ima moč 40 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 300 Pa
- Dolžina vzhodne predorske cevi je $L = 2278$ m.

Scenarij 7 zajema:

- Vključenih je 14 ventilatorjev, s tem višja poraba energije
- Dolžina požara je 10 m
- Temperatura sten ni bistveno višja, kritična hitrost zraka je prenizka – 1.278 m/s
- Požar ima moč 40 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 250 Pa
- Dolžina vzhodne predorske cevi je $L = 2278$ m.

Graf 86: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi v času $t = 1$ ura



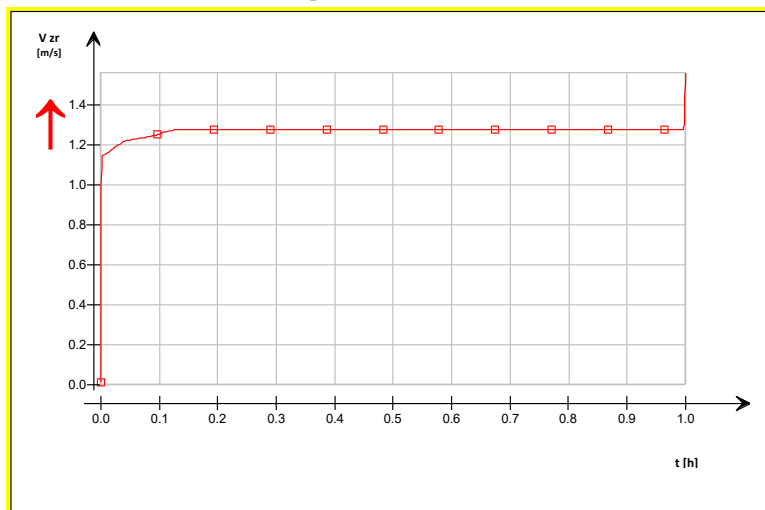
Graf 86

prikazuje potek hitrost zraka v predorski cevi pri vključenih 14 ventilatorjih, v času 1 ure.

Iz Grafa 86 vidimo, da v okviru predpisanih 180 sekund, NE dosežemo hitrosti zraka, višje od predpisane kritične hitrosti 1.50 m/s.

Realno obstaja možnost povratnega gibanja dima.

Graf 87: Prikaz hitrosti zraka v predorski cevi v času $t = 1$ ura



Graf 87

prikazuje potek hitrost zraka v predorski cevi pri vključenih 14 ventilatorjih, v času 1 ure.

Iz Grafa 87 vidimo, da v okviru predpisanih 180 sekund, NE dosežemo višje hitrosti zraka, od predpisane kritične hitrosti 1.50 m/s.

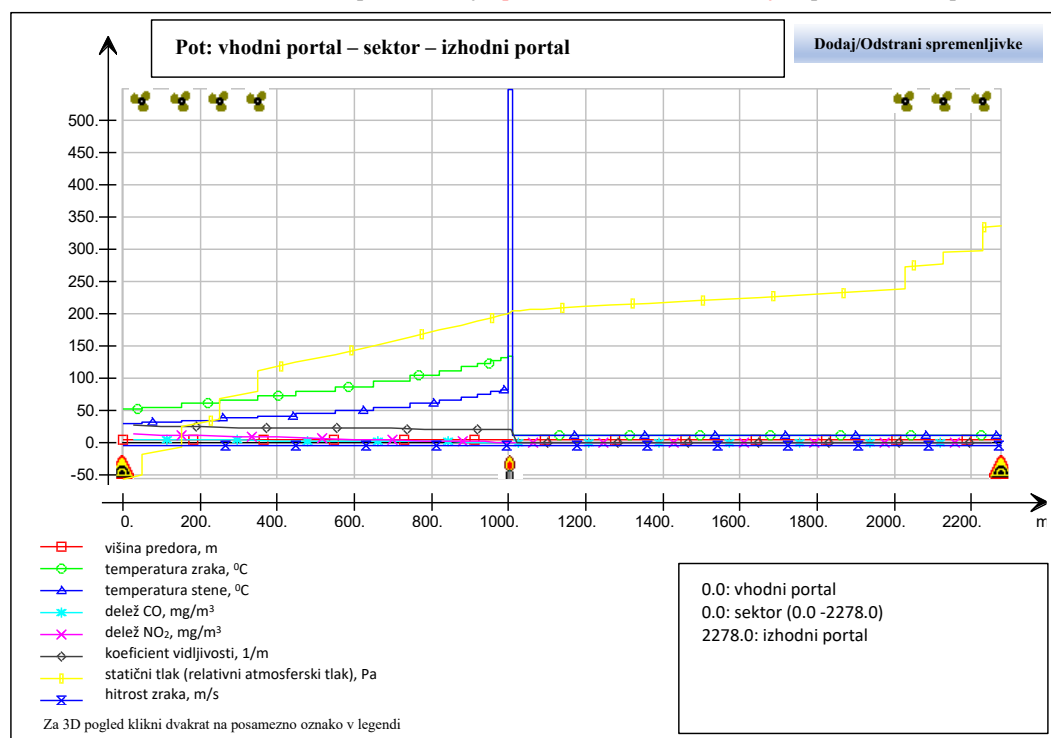
Nastanek povratnega gibanja dima je možen.

Scenarij 8:

Scenarij 8 zajema:

- Vključenih 12 ventilatorjev, s tem nižja poraba energije
- Dolžina požara je 10 m
- Temperatura sten ni bistveno višja,
- Kritična hitrost zraka je na meji, 1.503 m/s
- Požar ima moč 40 MW, vključeni so vsi ventilatorji, moč burje je 410 Pa.
- Dolžina vzhodne predorske cevi je $L = 2278$ m.

Graf 88: Kastelec - vzhodna cev, vzdolžno prezračevanje, požar 40 MW, 12 ventilatorjev, prikaz razmer pri 410 Pa



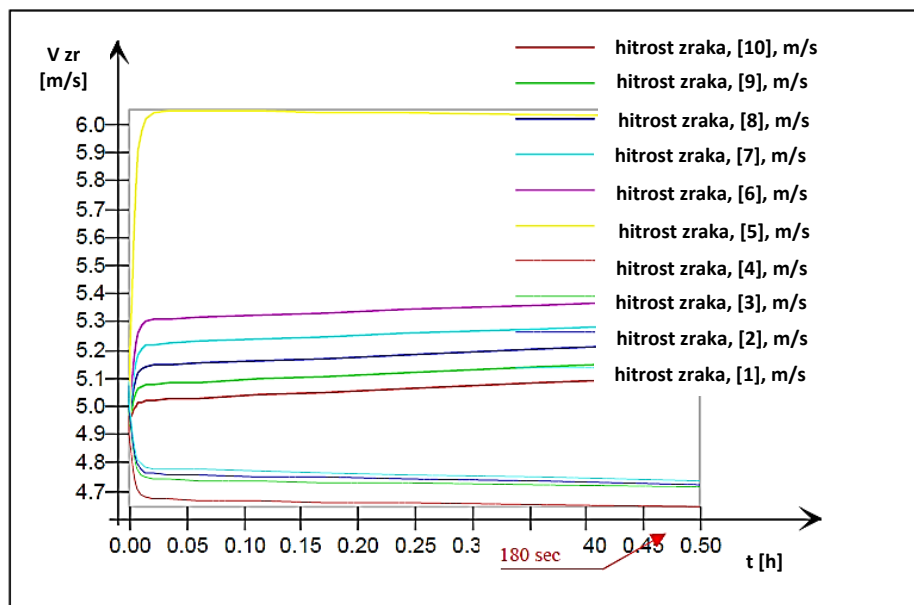
congestion5

Pri nižji hitrosti sicer pride do manjšega, toda nenevarnega povratnega gibanja dima, pri višjih hitrostih pa intenzivno gibanje zraka znižuje temperaturo zgorevanja.

Če to primerjamo s priporočili PIARC, ki zahtevajo ob izbruhu požara hitrost gibanja zraka v predoru do 1.50 m/s, po možnosti v pozitivni smeri, lahko ugotovimo, da ta hitrost pomeni povprečno hitrost gibanja zraka pred izbruhom požara. Ko požar izbruhne, pa se na samem mestu požara (zaradi kontinuitete) hitrost zaradi generacije dima precej poveča. Povprečna hitrost pa je večinoma manjša od kritične, kar pomeni, da praviloma prihaja do povratnega gibanja dima (backlayering). Vendar smo na osnovi eksperimentov ugotovili, da pri hitrostih gibanja zraka do 3.00 m/s povratno gibanje ne povzroča težav, ker dim v prvi fazi reševanja ostane tudi v povratni (negativni) coni ostaja pod stropom, ko poženemo ventilatorje, pa se

celotna količina dima (pred in za požarom) začne pomikati proti izhodu, torej v pozitivni smeri, stratifikacija dima pa počasi razpada.

Graf 89: Potek hitrosti v odvisnosti od časa (propagacija), požar 30 MW, 12 ventilatorjev, 600 m



Najneugodnejša hitrost zraka v primeru požara je 3.00 do 6.00 m/s. Pri višjih hitrostih intenzivno gibanje zraka znižuje temperaturo zgorevanja.

Nastop	Potrditev	Prenehanje	Skupina	Lokacija	Signal
05.01.2022 20:46:20	05.01.2022 20:46:42	06.01.2022 02:42:18	Kastelec	LP_P1B	leva cev omejevanje zaradi BURJE
11.01.2022 06:07:46	11.01.2022 06:07:56	11.01.2022 09:19:28	Kastelec	LP_P1B	leva cev omejevanje zaradi BURJE
12.01.2022 01:36:19	12.01.2022 01:36:34	12.01.2022 05:45:50	Kastelec	LP_P1B	leva cev omejevanje zaradi BURJE
12.01.2022 09:27:22	12.01.2022 09:27:36	12.01.2022 11:38:46	Kastelec	LP_P1B	leva cev omejevanje zaradi BURJE
27.02.2022 07:31:20	27.02.2022 07:31:32	01.01.1970 01:00:00	Kastelec	LP_P1A	Leva cev omejevanje zaradi BURJE
27.02.2022 13:06:19	27.02.2022 13:06:59	27.02.2022 13:11:20	Kastelec	LP_P1A	Leva cev omejevanje zaradi BURJE
27.02.2022 18:29:21	27.02.2022 18:29:44	01.01.1970 01:00:00	Kastelec	LP_P1A	Leva cev omejevanje zaradi BURJE
27.02.2022 22:16:39	27.02.2022 22:16:54	27.02.2022 22:21:39	Kastelec	LP_P1A	Leva cev omejevanje zaradi BURJE
05.03.2022 07:47:11	05.03.2022 07:47:21	01.01.1970 01:00:00	Kastelec	LP_P1A	Leva cev omejevanje zaradi BURJE
05.03.2022 12:22:25	05.03.2022 12:22:32	05.03.2022 12:27:25	Kastelec	LP_P1A	Leva cev omejevanje zaradi BURJE

Slika 28: Zaustavitev prometa v vzhodni predorski cevi predora Kastelec zaradi burje v času 5.1. do 5.3.2022 (vir: DARS, Regionalni nadzorni center Kozina, 2022)

7. POVZETEK IN UGOTOVITVE

Določitev enotnega in splošno uporabnega modela pretakanja zraka v predorskih ceveh za različne scenarije postopanja v primerih izrednih dogodkov, med katere spadajo požari kot eni izmed najbolj nevarnih primerov ekstremnih sprememb zračnega toka pri visokih temperaturah, v katerih so ogrožena človeška življenja in materialne dobrine, je praktično neizvedljiva. Enostavni matematični modeli, s katerimi se je skušalo rešiti problem prezračevanja v primeru požara, so premalo natančni. Zato si inženirji pomagamo z različnimi simulacijami, ki z uporabo numeričnih metod omogočajo izdelati za prakso sprejemljive približke, tako da so izpolnjene predpisane varnostne zahteve pri upravljanju s požari v različnih okoljih pri spremenljivih energijskih nivojih, ki so posledica intenzivnega gorenja v zaprtih prostorih.

V preteklih desetletjih je bilo narejenih več raziskav in analiz upravljanja s požari v zaprtih prostorih. Tako je Thomas že leta 1958 na podlagi ugotovljenega Froudovega števila trdil, da je razmerje med kritično hitrostjo zraka in hitrostjo oddajanja toplote pomembno za razvoj povratnega plastenja dima. Predstavil je kritično Froudovo število za napovedovanje kritične hitrosti zraka in ugotovil, da je pri kritičnem Froudovem številu 1, pojav povratnega plastenja dima zanemarljiv. Ker je Froudovo število osnova za določanje kritične hitrosti zraka, je iz njega izpeljana tudi Kennedyjeva enačba. Kennedy (1997) je s predlagano enačbo, ki dosega nižje kritične hitrosti zraka, dosegel soglasje za velike požarne teste, izvedene v predoru Memorial v ZDA. Ugotovil je tudi, da je za nastanek povratne (zaostale) plasti zelo pomembna geometrija ognja. Upoštevajoč omenjene podatke o visoki vrednosti oddane toplote, Kennedyjeva enačba še vedno omogoča kakovostno oceno kritične hitrosti za potrebe načrtovanja prezračevanja cestnih predorov.

Na splošno velja, da brez nadrobnega poznavanja delovanja ventilatorjev, ki dejansko zagotavljajo predpisano prezračevanje predora v vseh vremenskih razmerah (brezvetrje, sunkovit veter, burja, ipd.) ni možno izdelati učinkovitih protokolov prezračevanja v normalnih in izrednih razmerah. Z ustreznim načinom delovanja ventilatorjev, se zunanji vpliv vetra na požar v predoru prepreči do take mere, da se zagotovijo razmere, ki preprečujejo takojšnje mešanje hladnega zunanjega zraka z vročimi dimnimi plini, kar pomeni, da se čim dlje ohrani stratifikacija in onemogoči pojav povratnega toka v predorski cevi. Doseganje takšnih razmer v predorski cevi je še vedno vezano na raziskave in simulacije ter ne nazadnje na požarne poskuse v realnem okolju.

V normalnih voznih in meteoroloških razmerah že samo gibanje vozil v predorskih ceveh povzroča batni efekt, kar zadostuje za doseganje predpisane kakovosti prezračevanja večine cestnih predorov. To je bilo potrjeno z rezultati numerične simulacije, v kateri so bili

uporabljeni spremenjeni parametri vetra in vzdolžnega naklona predorskih cevi pri hitrosti prometa 100 km/h z upoštevanjem učinkov vključenih ventilatorjev.

Cilj pričujočega raziskovalnega dela je bil dosežen. Z znanstvenimi analizami gibanja zraka v predorskih ceveh se je natančno ugotovilo, kolikšni so prispevki posameznih deležnikov za potrebe bistvenega zmanjšanja koncentracij polutantov pri obratovanju cestnih predorov.

V nadaljevanju podajamo potrditev postavljene hipoteze, ki pravi, da so emisije, ki nastanejo v primeru požara ali v normalnem obratovanju cestnih predorov, tesno povezane s kritično hitrostjo zraka v predorski cevi. V primeru požara v predoru, je poleg ostalih emisij, navzoča še emisija dima.

Emisija dima in strupenih plinov ter visoke temperature, ki jih obravnavamo kot posledice požarov v predorski cevi, zelo ogrožajo ljudi in okolje (npr. onesnaženje površinske in talne vode ter ne nazadnje povzročijo porušitev predora, kar je zelo nevarno v urbanih območjih, saj so predori lahko zgrajeni pod različnimi občutljivimi civilnimi objekti). Poleg drugih nevarnosti, požar v predoru lahko povzroči povratno gibanje zraka, ki je v praksi nezaželeno, odvisno pa je od razmer in dejavnikov v in izven območja predora. Pomembna je tudi razporeditev oz. stratifikacija toka zraka v prečnem prerezu predorske cevi v cilju čim daljšega ohranjanja zadrževanja dima v stropnem delu predorske cevi.

Postavljene so bile metode raziskovanja in matematični model predora. Pričakovani rezultati se ujemajo z dobljenimi, poudarek je bil na uporabi in zanesljivosti Kennedyjeve enačbe. Pri tem smo opazovali vrednosti koncentracij plinov CO₂, NO₂, vidljivosti (koncentracijo dima), kritično hitrost zraka, ipd. Dobljene podatke smo obdelali tako računsko kot tudi z računalniško simulacijo, in sicer smo uporabili 4 različne enačbe in na koncu primerjali izračunane ter dobljene vrednosti, izračunali napake (ki se gibljejo okoli 5%), kar je skladno z navodili, smernicami, oz. zakonodajo.

Ventilatorji so nujno potrebni za vzdrževanje ustreznih voznih razmer in varnosti prometa v cestnih predorih, kar je s pomočjo izvedenih primerjav dokazano v pričujočem delu. Na izhodu iz predora so dobljene vrednosti (*Preglednica 9*) praktično enake, kar pomeni, da kljub različnim vrednostim delovanja vetra na zračni tok v predorski cevi, mehansko prezračevanje izpolnjuje predpisane varnostne zahteve pri obratovanju predora v različnih razmerah prezračevanja.

To pomeni, da je treba vedno zagotoviti razmere, ki sočasno vzdržujejo razslojevanje plasti dima in svežega zraka. Najbolj pomembnih je prvih 10 minut po nastanku požara. Po umiku ljudi iz predora, se vključi ventilatorje, s tem se hitrost zraka poveča na 3,60 m/s, kar zadošča za uspešno odstranjevanje dima in vročih plinov.

Iz podanih rezultatov raziskav je razvidno, da smo pri analizi praktičnega primera, največji poudarek namenili kritični hitrosti zraka v predorski cevi in njeni odvisnosti od tlaka burje. Za obdelane scenarije je bilo pomembno zagotavljanje dejstva, da se požar in dim ne razširita v nasprotni smeri vožnje, in da je s pomočjo ventilatorjev zagotovljena povprečno hitrost zraka vsaj 1,5 m/s v prečnem prerezu predora ob istočasni kontroli stratifikacije dima, skladno z RVS smernicami.

Ostaja pa odprto vprašanje, kaj pomeni za prezračevanje predora v izrednih dogodkih, če je hitrost zračnega toka v predoru pod 1,5 m/s.

Pri točno določenih pogojih, ko zunanji zrak ne vpliva na hitro ohlajanje nastalih dimnih plinov, oz. mu je to onemogočeno z uporabo ventilatorjev (stratifikacija se ohranja), pride do delnega povratnega toka dimnih plinov. Upoštevanje potrebnega časa za umik do 10 minut, dejansko omogoča evakuacijo večine udeležencev brez posledic, saj se dimni plini v tem času zadržujejo pod stropom predorske cevi preden se zrak pomešan z dimom toliko ohladi, da se spusti proti cestišču. Takšno stanje, ko je predorska cev zadimljena, ni primerno za evakuacijo ljudi.

Pogosto je v takšnih izrednih dogodkih prisotna tudi panika med udeleženci v prometu, kar še dodatno slabša učinkovitost reševanja. Ker je uspešnost reševanja ljudi pri dvocevni predorski sistemih bistveno boljša, so temu primerno zgrajeni različni prečniki v oddaljenostih med 350 m do 400 m, v nekaterih primerih tudi manj. Zahteva se, da je v izrednih primerih v sosednji cevi zagotovljen zračni nadtlak, da je prehajanje npr. dima in onesnaženega zraka iz območja nesreče, popolnoma preprečeno. To se zagotovi z ventilatorji, ki v takem primeru obratujejo po protokolu, ki velja za izredne dogodke, med katere spadajo tudi požari. Vsakozi pa je potrebno paziti, da količine zraka iz vzporedne predorske cevi z nadtlakom, ne vplivajo na stratifikacijo dimnih plinov v predorski cevi, v kateri je požar, kar pomeni, da se vzdržujejo takšne razmere, ki dejansko pozitivno vplivajo na čim daljše zadrževanje dima v stropnem delu predorske cevi.

Iz literature smo izbrali največkrat navajane enačbe, ki so osnova za izpeljavo Kennedyjeve enačbe in jih pri izračunih tudi uporabili. Na osnovi primerjave rezultatov in napak smo podali obrazložitve in zaključke v Preglednicah 4, 5, 6, 11, 12 in 13.

Za izvedbo simulacij požarov različnih moči, je bil za vzhodno cev predora Kastelec uporabljen švedski program IDA RTV (Road Tunnel Ventilation) 3.0 (2017). Vsakozi smo pri izvedenih simulacijah upoštevali zakonsko določene mejne vrednosti, ker je le na tak način omogočena potrditev hipoteze.

V Preglednicah 4 do 7 je možna primerjava napak, računanih po enačbah 23, 24, 26 in 30, z vrednostmi rezultatov simulacij, dobljenih s programom IDA RTV (2017), pri različnih močeh

požara. V hipotezi postavljena trditev glede določanja kritične hitrosti zraka v predorski cevi s Kennedyjevo enačbo je pokazala, da je enačba uporabna in dovolj zanesljiva za potrebe načrtovanja in preverjanja celovitih prezračevalnih sistemov v cestnih predorih. V zadevnem računalniškem programu so z uporabo numeričnih metod sprogramirani programski paketi, za analiziranje različnih scenarijev izrednih dogodkov. Narejene primerjave med navedenimi obsežnimi izračuni so nedvoumno pokazale, da je Kennedyjeva enačba ustrezna.

Na kratko povzemamo rezultate izvedenih simulacij v okviru analiziranja dogajanj v vzhodni predorski cevi cestnega predora Kastelec, ki je služil kot vzorčni primer tovrstne obdelave. Za celovito razumevanje prezračevanja v izrednih razmerah, so bile izdelane parametrične analize dogajanja z upoštevanjem burje, kot močnega vetra s spremenljivimi smermi in jakostmi. Ti dve lastnosti močno vplivata na kakovostno rešitev zahtevnega prezračevanja tudi za primere, ko sta povečana jakost in spremenljive smeri burje delujoči v nasprotni smeri prometa.

Podobno kot na *Grafih 30 in 31*, lahko tudi na *Grafu 32* kjer je prikazana primerjava tlakov 0 in 100 Pa, ugotovimo, da se z višjo hitrostjo vetra, znižuje vstopna hitrost zraka in količina svežega zraka. Primerjava različnih hitrosti vetra - burje v razmerah brez požara pokaže, ne glede na velikost tlakov zraka, števila vključenih ventilatorjev, hitrosti vozil, ki ne preseže omejitev 100 km/h, vrednosti merjenih količin CO, NO₂ in dima, znotraj dovoljenih vrednosti.

Rezultati vseh simulacij gibanja zraka v predorski cevi z upoštevanjem normalnih razmer brez požara in izrednih razmer s požarom, so bili osnova za preverjanje pravilnosti v tem delu postavljene hipoteze. Nedvoumno je bilo ugotovljeno, da je Kennedyjeva enačba dovolj zanesljiva za preverjanje stanja kakovosti prezračevanja v cestnih predorih tudi za simulacije izrednih dogodkov med katere prištevamo požare različnih moči.

Za primere, ko znašajo hitrosti zraka v predorski cevi med 0 in kritično hitrostjo 1,5 m/s, so pojavi v primeru požara še neraziskani. To pomeni, da je, glede na dosedanje poznavanje teh procesov, treba veliko pozornosti posvetiti stratifikaciji zraka v predorski cevi.

O dogajanjih, značilnostih in upravljanju nadzora gibanja dima v predorskem požaru je bilo narejenih veliko raziskav in veliko matematičnih modelov, katerih rezultati so omogočili izdelavo kakovostnih ocen velikosti kritične hitrosti zraka v predorskih ceveh. Neodvisno od navedenega, je treba v bodoče raziskati še veliko možnih primerov načina gibanja zraka v predorskih ceveh v primeru požarov, da bi bilo preprečevanje požarov in evakuacija ljudi v vsakem primeru dovolj učinkovita in varna. To velja tudi za bodoča obdobja, ko bodo prometna sredstva gnana brez uporabe fosilnih goriv. Več strokovnih ocen je, da bodo morebitni požari tudi v takšnih okoljih zagotovo prisotni, njihovo gašenje pa bo zahtevalo specifične postopke, ki bodo po eni strani zahtevali ohranjanje življenj udeležencev v prometu in ne nazadnje v čim večji meri ohranitev predorskih cevi za nadaljnje obratovanje.

V okviru programa raziskav se bo moralo upoštevati poleg skupnih dejavnikov tudi za vsak primer posebej dejansko stanje, kot so razne ovire, vzdolžni naklon predorskih cevi, lokacija ognja, ipd. Trenutne raziskave upoštevajo en sam dejavnik, za katerega je značilno, da se vir požara nahaja v središču predora. Znano je, da je danes malo podobnih raziskav, ki bi obravnavale ugotavljanje kritične hitrosti zraka v predorih z upoštevanjem več dejavnikov. Vsekakor so ugotovljeni rezultati v pričujoči doktorski disertaciji dobra osnova za nadaljevanje raziskovalnega dela na tem ožjem področju prezračevanja cestnih predorov.

Med drugimi neraziskanimi procesi analiziranja požarnih scenarijev izpostavljamo, da se zaradi hitrega segrevanja oboda predora in s tem močnega sevanja toplote, lahko vnamejo tudi vozila, ki niso direktno udeležena v nesreči. Ko toplotni tok sevanja preseže kritični sevalni tok, se sosednja vozila vžgejo. Tako povečan požar ima velik vpliv na kritično hitrost zraka, razdaljo med viri več požarov. V tem primeru je treba upoštevati vzdolžni naklon predora in druge dejavnike, ki direktno vplivajo na določanje kritične hitrosti zraka v predoru, saj velja, da je pri višji vzdolžni hitrosti prezračevanja krajša dolžina dima, vendar je lahko ogenj zaradi tega močnejši.

Pozitivne lastnosti pri doseganju kvalitete zraka so izražene, če so predori primerno oblikovani in so pravilno prostorsko umeščeni, pri čemer predvsem v urbanem okolju prerazporedijo emisije iz prometa. Tako so novejši predori zgrajeni predvsem in samo z namenom disperzije koncentracij. Vsi cestni predori vsebujejo in prerazporejajo emisije iz prometa. Na zelo obremenjenih cestah, so vrednosti na grobo 5 do 10 krat višje za NO_x in CO in 2 do 3 krat višje za PM_{10} .

Na cestah in s tem v cestnih predorih je vse več vozil na električni pogon. Če smo sprva predvidevali, da bodo zaradi predvidenih nižjih emisij pri normalnih voznih razmerah prezračevalne naprave v predorih manjše, so požari in ne nazadnje simulacije požarov na takih vozilih v zadnjih letih taka predvidevanja ovrgli. Požari vozil na elektriko so sicer primerljivi s požari vozil na klasični pogon, vendar baterija najprej glasno počí, sprosti se veliko dima ter dosežene so višje temperature. Način gašenja električnih vozil je podoben klasičnim, v zadnjem času si gasilci pomagajo s posebnimi ponjavami, težavo pa predstavlja voda, ki se je pri gašenju vozil na elektriko porabi precej več (ocena nemške gasilske zveze je 5.000 litrov). Zaradi vsebnosti strupenih snovi (npr. fluorovodikova kislina in litijeve spojine), ki lahko dovoljene vrednosti presegajo tudi do stokrat. Odvod kontaminirane vode je v predorih dosežen na ta način, da je speljana v betonske rezervoarje, ki so zgrajeni na vhodih v predore. Kapaciteta teh rezervoarjev je vezana na količino vode, ki je potrebna za enkratno pranje predora. Kontaminirano vodo se prepelje na kemično čiščenje. Tudi v sajah, ki se lepijo na stene predorskih cevi, je prisotnih veliko kobaltovih, manganovih in nikljevih oksidov, ki jih morajo strokovno odstraniti za to usposobljene institucije oz. podjetja z ustreznimi dovoljenji.

Trend razvoja prometa in tudi novih pogonskih tehnologij (H2) v zadnjih letih kaže na še večjo izpostavljenost predorov. V primeru prometnih nesreč s požarom bo treba vsem udeležencem zagotavljati čim večjo varnost, kar pomeni posodabljanje opreme in scenarijev za reševanje (gašenje z meglo, zagotavljanje stratifikacije, ipd.).

8. ZAKONODAJA IN PREDPISI

V skladu s 15. členom Direktive Evropskega parlamenta in sveta 2004/54/ES o minimalnih varnostnih zahtevah za predore v vseevropskem cestnem prometu, morajo države članice evropske skupnosti vsaki dve leti poročati Komisiji o izvedenih nadgradnjah predorov, oziroma procesu implementacije direktive 2004/54/ES. Skladno z zahtevami omenjene direktive, je Ministrstvo za promet Republike Slovenije leta 2006 naročilo Prometnem inšpektoratu Republike Slovenije izvedbo izrednih inšpekcijskih pregledov predorov in poročilo o usklajenosti z direktivo. Slovenija je dolžna evropski komisiji poročati o realizaciji vsaki 2 leti, hkrati pa se je zavezala, da bo svoje predore uskladila z zahtevami direktive 2004/54/ES.

Pravni sistem EU je enostaven, saj pozna dve glavni obliki pravnih aktov:

- *uredbe* se uporabljajo v celotni Evropski uniji takoj, ko so sprejete,
- *direktive* pa je treba najprej prenesti v nacionalno zakonodajo.

V direktivah je naveden cilj predpisa, vendar se države članice same odločijo, kako bodo ta cilj dosegle.

Pri navedbah *zakonodaje in predpisov* s področja predorov lahko hitro ugotovimo, da Slovenija, podobno kot nekatere druge države, npr. Hrvaška, poleg svojih smernic in normativov, pri gradnji predorov uporablja tudi predpise nekaterih drugih evropskih držav (Avstrija, Nemčija, ipd.).

Skladnost svetovnih direktiv in nacionalnih predpisov mora zagotavljati neko minimalno varnost. Prečniki v predorih so za vse države predpisani na vsakih 500 metrov, lahko pa so zgrajeni tudi bolj pogosto (St. Gothard npr. na 300 m). To pomeni, da ima vsaka država pravico predpisati ostrejša pogoje (princip OPN : OPPN). Skupni predor dveh držav je lahko problem neskladnosti zakonodaje ali različnih političnih interesov, npr. Karavanke med Avstrijo in Slovenijo, kjer že električna napetost lokomotiv ni enaka, ipd.

Zaradi svoje velike uparjalne energije je voda zelo učinkovita pri gašenju požarov. V zadnjem času je ena bolj aktualnih tem Uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v RS, v delu, ki govori o gašenju s hidranti in odvodu ti. odpadne vode v predorih. Gašenje s hidranti ni primerno pri požaru tekočih goriv. Bencina npr. ne smemo gasiti z vodnim curkom, uporabiti moramo prah, peno ali CO₂, vse skupaj pa na koncu predstavlja obremenitev za okolje (podtalnica, brežine, polja, reke, potoki, ipd.). Pri curku velika količina vode nekam odteče, le malo na kontroliran način.

Tudi pri požaru električnega avtomobila težavo predstavlja voda, ki se je med gašenjem porabi veliko več. Ta nikakor ne sme zaiti v kanalizacijski sistem ali podtalnico, saj vsebnost strupenih

snovi lahko celo stokratno presega dovoljene vrednosti, npr. zelo jedka in strupena fluorovodikova kislina, ki bi lahko uhajala iz poškodovanih litij-ionskih baterij. Saje na stenah in tleh predora, so zelo strupene. Vsebujejo velike količine kobaltovih, nikljevih in manganovih oksidov, ki lahko na nezaščiteni koži povzročijo hude alergije. Čiščenje po požaru električnega avtomobila je torej treba prepustiti strokovnjakom.

V zadnjih desetletjih so bili številni predori po svetu opremljeni s požarnimi škropilniki (sprinklerji), kar pa se je pokazalo za neučinkovito. Pri običajnih sprinklerskih sistemih večina vode odteče neuporabljene, izjemno majhen del se porabi za gašenje. Posledica je poplava v objektu in nastane škoda, ki je lahko večja od škode zaradi požara ter vpliv te onesnažene vode na okolico. (IZS, 2020)

V večini primerov lahko sprinklerski sistem nadomestimo s sistemom gašenja z visokotlačno meglo. Sistem deluje na videz enako kot požarni škropilniki, zaradi razpršitve vode v mikroskopske kapljice je poraba vode do 10-krat manjša. (IZS, 2020)

Posledica gašenja je hitro ohlajevanje, ustavljena je oddaja toplote (sevanje), hitro se zmanjša koncentracija kisika, ljudje so lahko v prostoru, škoda je minimalna, izpirajo se dim in drugi produkti gorenja, voda hitro izhlapi. Sistem vodne megle je zelo zanesljiv, razvod cevi zavzame manj prostora, ipd.

Kljub vsemu pa je podzemna gradnja zelo pomembna za zmanjšanje emisij v okolje in s tem povezanih okoljskih težav, npr. predor Šentvid omogoča tekoč promet iz Ljubljane ali v Ljubljano iz vseh smeri (predvsem tovorni promet). Razvoj avtomobilske tehnologije je posegel tudi na področje emisij, ki nastanejo pri zgorevanju v motorjih. Na cestah je vedno več avtomobilov na električni pogon, na trg prihajajo motorji na bioplin, vodik, ipd., kar pomeni korake, usmerjene proti globalnemu segrevanju (najbolj aktualnemu in spornemu vprašanju 21. stoletja), oz. ohranjanju stabilnih pogojev zemeljskega delovanja za življenje.

Človeštvo se je že pred nekaj desetletji spoprijelo s preprečevanjem in odpravljanjem posledic zaradi kislega dežja, prenehanjem rabe svinca v gorivih, aktualen je ogljični odtis, ipd. Pri emisijah v okolje je s transportom povezana tudi pridelava hrane (požar Mont Blanc, 24.3.1999, prevoz moke in margarine), ipd.

Najbolj tekoč promet je zagotovljen v dvocevnih predorih. Tudi za najdaljši slovenski predor Karavanke je v gradnji druga cev, kar pomeni tekoč promet, manj zapor, brez čakalnih vrst, precej nižje emisije, večja varnost tudi v primeru požara, ipd.

8.1 SEZNAM UPORABLJENE ZAKONODAJE IN PREDPISOV

Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG, SR 814.20) vom 24. Januar 1991; Bezug: www.admin.ch/ch/d/sr/sr.html > SR 814.20

Deutsche Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS) vom 17. Mai 1999 mit Ergänzungen vom 27. Juli 2005; Bezug: www.umweltbundesamt.de (wird nach Inkrafttreten der AwSV durch diese ersetzt)

Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201) vom 28. Oktober 1998; Bezug: www.admin.ch/ch/d/sr/sr.html > SR 814.201

Gradbeni zakon (Uradni list RS, št. 61/17 in 72/17 – popr.)

IZS MST-13-2020, Smernica za zajem požarne vode, Janez Balantič, dr. Danijela A. Skobir Balantič, www.izs.si, maj 2020

NFPA 502. (2020). Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. NFPA 502

PIARC, Fire and smoke control in road tunnels, PIARC Committee on Road Tunnels, C5.

Požarna smernica Nevarne snovi

Požarna smernica Skladiščenje in ravnanje z vnetljivimi tekočinami.

Pravilnik o požarnem redu (Uradni list RS, št. 52/07, 34/11 in 101/11)

Pravilnik o tehničnih in organizacijskih ukrepih za skladiščenje nevarnih kemikalij (Uradni list RS, št. 23/18),

Pravilnik o skladiščenju izrabljenih gum (Uradni list RS, št. 37/11)

Pravilnik o protieksplzijski zaščiti (Uradni list RS, št. 41/2016)

RABT. (2016). Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunnel, Germany: Richtlinie, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit

RVS 09.02.31. (2014). Tunnel / Tunnel Equipment / Ventilation Systems - Basic Principles. Wien, AT: Richtlinie, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.

Na Hrvaškem v pretežni meri uporabljajo prevedene Avstrijske predpise RVS.

Smernica za zajem požarne vode (IZS MST-13-2020)

[<https://www.izs.si/assets/media/izsnovo/2020/MST/Smernica-IZS-MST-13-2020-Smernica-zajem-po%C5%BEarne-vode-www.pdf>]

Standardi, neposredno ali smiselno uporabni za predore:

- SIST EN 12845: 2003-Vgrajene naprave za gašenje- Avtomatski sprinklerski sistemi
- Projektiranje, vgradnja in vzdrževanje
- NFPA 750: Standard on Water Mist Fire Protection Systems, 2003 Edition
- PrEN 14497: 2005 – Design and Installation of Water Mist Systems
- VdS 2095: Richtlinien für automatische Brandmeldeanlagen
- SIST EN 25923: 1997-Požarna zaščita-Gasila-Ogljikov dioksid
- SIST ISO 6183: 1995 –Oprema za požarno zaščito-Vgrajeni gasini sistemi z ogljikovim dioksidom-Načrtovanje in vgradnja
- SIST EN 25923: 1997-Požarna zaščita-Gasila-Ogljikov dioksid
- SIST ISO 6183: 1995 –Oprema za požarno zaščito-Vgrajeni gasini sistemi z ogljikovim dioksidom-Načrtovanje in vgradnja
- NFPA 204: Standard for Smoke and Heat Venting
- DIN 14096: Pravila o požarni varnosti
- DIN 14675: Javljalniki požarov, zasnova in delovanje
- DIN 4102: Požarne lastnosti gradiv in gradbenih elementov

Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, [S.l.], v. 46, n.7, p. 422-428, july 2017.

Tehnične zahteve za elektrostrojno opremo v novih kratkih predorih in pokritih vkopih dolžin do 500 m

Tehnična smernica Požarna varnost v stavbah (TSG-1-001: 2019)

Uredba o izvajanju Uredbe (ES) št. 1272/2008 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 16. decembra 2008 o razvrščanju, označevanju in pakiranju snovi ter zmesi, o spremembi in razveljavitvi direktiv 67/548/EGS in 1999/45/ES ter spremembi Uredbe (ES) št. 1907/2006 (Uradni list RS, št. 56/10)

Uredba o preprečevanju večjih nesreč in zmanjševanju njihovih posledic (Uradni list RS, št. 22/16)

Uredba o skladiščenju trdnih gorljivih odpadkov na prostem (Uradni list RS, št. 53/19)

Uredba o merilih za uvrstitev dela z gensko spremenjenimi organizmi v zaprtem sistemu v varnostni razred in o zadrževalnih ter drugih varnostnih ukrepih za posamezen varnostni razred (Uradni list RS, št. 71/11)

Uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji

Verordnung über den Schutz vor Storfällen (Storfallverordnung, StFV, SR 814.012) vom 27. Februar 1991; Bezug: www.admin.ch/ch/d/sr/sr.html > SR 814.012

Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV), Beschluss des deutschen Bundesrates vom 23.05.2014, Drucksache Beschluss Drs. 77/14, Bezug: www.bundesrat.de > Dokumente (ersetzt VwVwS)

Verordnung über den Umgang mit Organismen in geschlossenen Systemen (Einschliessungsverordnung, ESV, SR 814.912) vom 9. Mai 2012; Bezug: www.admin.ch/ch/d/sr/sr.html > SR 814.912

Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, ABl. L 353 vom 31. Dezember 2008 (Stand konsolidierte Fassung vom 01.06.2015); Bezug: <http://eur-lex.europa.eu>zt)

Zakon o varstvu pred požarom (Uradni list RS, št. 3/07 – UPB1, 9/11, 83/12 in 61/17 – GZ)

Zakon o vodah (ZV-1) (Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 – ZZdrI-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14 in 56/15)

Zakon o varstvu okolja (ZVO-1) (Uradni list RS, št. 39/06 – uradno prečiščeno besedilo, 49/06 – ZMetD, 66/06 – odl. US, 33/07 – ZPNačrt, 57/08 – ZFO-1A, 70/08, 108/09, 108/09 – ZPNačrt-A, 48/12, 57/12, 92/13, 56/15, 102/15, 30/16, 61/17 – GZ, 21/18 – ZNOrg in 84/18 – ZIURKOE)

Zakon o kemikalijah (Uradni list RS, št. 110/03 – uradno prečiščeno besedilo, 47/04 – ZdZPZ, 61/06 – ZBioP, 16/08, 9/11 in 83/12 – ZFfS-1)

9. VIRI

BALANTIČ J., SKOBIR BALANTIČ, D. A., 2020, Smernica za zajem požarne vode. *IZS MST*, let. 13, 36 str.

BANJAC, M., NIKOLIĆ, B., 2008, Numerical Study of Smoke Flow Control in Tunnel Fires Using Ventilation Systems. *FME Transactions*, vol. 36, str. 145-150.

BRAHIM, K., MOURAD, B., AFIF, E. C. AND, LETTM B. A., 2013, Control of Smoke Flow in a Tunnel. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 6, iss. 1, str. 49-60.

BRING, A., MALMSTRÖM, T. G., BOMAN, C. A., 1997, Simulation and Measurement of Road Tunnel Ventilation. *Tunnelling Underground Space Technology*, vol. 12, iss. 3, str. 417-424.

CEKLIN, V., 2003, *Varnost – nevarnost v predorih : diplomsko delo*. Ljubljana, 54 str.

DONJERKOVIĆ, P., DRAKULIĆ, M., 2000, A Critical-Velocity Determination of Road-Tunnel Ventilation in isothermal Conditions of a Fire-Incident Model test. *Strojniški vestnik : Journal of Mechanical Engineering*, let. 46, št. 7, str. 422-428.

HADDAD, R. K., MALUK, C., REDA, E. AND HARUN, Z., 2019, Critical Velocity and Backlayering Conditions in Rail Tunnel Fires : State-of-the-Art Review. *Journal of Combustion*, vol. 2019, 20 str.

HONG, P. G., YI, Z. Q., 2019, Review of Research on Critical Velocity in Tunnel Fire : International Symposium on Architecture Research Frontiers and Ecological Environment. *E3S Web of Conferences*, vol. 79, iss. E3S Web Conf., 4 str.

IDA RTV - Confidential Draft [online]. EQUA, 2017. [citirano 1.4.2020]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.equa.se/en/tunnel/about/about-equa>>.

KENDA, I., 2008, *Emisije škodljivih snovi v cestnih predorih : magistrsko delo*. Ljubljana, 108 str.

KENNEDY, W.D., 1996, Critical Velocity : Past, Present and Future, One Day Seminar on Smoke and Critical Velocity in Tunnels. *ITC*, vol. 2, str. 24.

LANCHAVA, O., ILIAS, N., 2019, Critical Velocity Analysis for safety Management in Case of Tunnel Fire. *MATEC Web of Conferences, SESAM 2019*, vol. 305, 7 str.

- LI, J., TIAN, Y., LI, Y., YUHAN ZHAO, Y., 2017, Numerical and Experimental Study on the Effects of the Slope on the Critical Velocity in Titled Tunnels. *Procedia Engineering*, vol. 205, str. 1864-1870.
- LI, Y. Z., LEI, B., INGASON, H., 2013, Theoretical and Experimental Study of Critical Velocity for Smoke Control in a Tunnel Cross-Passage. *Fire Technology*, vol. 49, str. 435-449.
- LIU, Y., CASSADY, S., 2014, A Modified Critical Velocity for Road Tunnel Fire Smoke Management with dedicated Smoke Extraction Configuration. *Case Studies in Fire Safety*, vol. 2, str. 16-27.
- LAHARNAR, E., 2012, *Varnost v predorih : diplomsko delo*. Kranj, 55 str.
- LUIN, B., PETELIN, S., 2020, Coupling Models of Road Tunnel Traffic, Ventilation and Evacuation. *Transport&logistika*, let. 35, št. 3, str. 336-346.
- MODIC, J., 2004, Obratovanje cestnih predorov s poudarkom na požarni varnosti. *Strojniški vestnik : Journal of Mechanical Engineering*, let. 50, št. 1-4, str. 265-274.
- MODIC, J., 2021, *Cestni predori v teoriji in praksi. Priročnik za projektante in izvajalce, učbenik za študente*. Ljubljana : DARS, 278 str.
- MODIC, J., 2003, Model predora in simulacija prezračevanja v primeru požara. *Strojniški vestnik : Journal of Mechanical Engineering*, let. 49, št. 9, str. 458-468.
- PETELIN, S. IN OSTALI, *Uspešnost intervencije v predorih : Raziskovalna razvojna naloga s področja požarne varnosti, zaključno poročilo, ver. 7 Ljubljana [online]*. MORS - Uprava Republike Slovenija za zaščito in reševanje, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet, 2005, 194 str., [citirano 1.4.2021]. Dostopno na svetovnem spletu: <http://www.sos112.si/slo/tdocs/predori_var.pdf>.
- PIS - PRAVNOINFORMACIJSKI SISTEM RS, 2010, Uredba o tehničnih normativih in pogojih za projektiranje cestnih predorov v Republiki Sloveniji, *Uradni list RS*, št. 48/06, 54/09 in 109/10, 64 str.
- RIGTER, B. P., 2003, *Two Layer Theory applied to the Phenomenon of Backlayering*, 11th International Symposium on Aerodynamic & Ventilation of Vehicle Tunnels. Luzern : BHR group Limited, 520 str.
- STURM P. J., MINARIK, S., 2010, 5th Symposium - Tunnel Safety and Ventilation/Sicherheit und Belüftung von Tunnelanlagen. *Herausgeber*, vol. 93, 309 str.
- SUBAN, A., 2016, Vpliv vetra na požarno varnost predora. *Revija Gasilec*, let. 70, št. 7/8, str. 50-53.

- SUBAN, A., 2016, Varnost v cestnih predorih. *Revija Gasilec*, let. 70, št. 3, str. 38-41.
- SUBAN, A., PETELIN, S., VIDMAR, P., 2015, Effect of Gusty Wind on Road Tunnel Safety. *Strojniški vestnik : Journal of Mechanical Engineering*, let. 61, št. 7-8, str. 421-431.
- STACEY, C., BEYER, M., AGNEW, S., 2020, Critical of critical Velocity – an Industry Practitioner’s Perspective : *10th International Conference ‘Tunnel Safety and Ventilation’ 2020*, Graz, 16 str.
- TARADA, F., 2010, New Perspectives on the Critical Velocity for Smoke Control, Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security. *Report ISTSS SP*, Frankfurt am Main, str. 420-426.
- TARADA, F., 2012, *The Critical Velocity for Smoke. Control Managing Director, Mosen Ltd., HBI Haerter Ltd., Kennedy Lecture*, 33 str.
- VIDMAR, P., PETELIN, S., ŠAVNIK, P., 2005, Prenos toplote in gibanje fluidov med požarom v cestnem predoru. *Gradbeni vestnik*, let. 54, št. 2, str. 34-41.
- VLADA REPUBLIKE SLOVENIJE, ŠTAB CIVILNE ZAŠČITE ZA ZAHODNO ŠTAJERSKO, *Regijski načrt zaščite in reševanja ob nesreči v predoru [online]*. MO, URSZR, IZPOSTAVA CELJE, 2005, 51 str., [citirano 2.11.2021]. Dostopno na svetovnem spletu: <<http://www.sos112.si/slo/clanek.php?catid=27&id=249>>.
- WENG, M. C., LU, X. L., LIU, F., SHI, X. P., YU, L. X., 2015, Prediction of backlayering Length and critical Velocity in Metro Tunnel Fires. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 47, str. 64-72.
- WU, Y., STODDARD, J. P. AND JAMES, P., ATKINSON, G.T., 1997, Effect of Slope on Control of Smoke Flow in Tunnel Fires. *Fire Safety Science*, vol. 5, str. 1225-1236.