

საავტომობილო გვირაბში სხვადასხვა სიმძლავრის ხანძრის განვითარების ანალიზი რიცხვითი მოდელირების მეთოდით

ზაზა ხოკერაშვილი, ნინო რატიანი, ნინო არუდაშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, შრომის უსაფრთხოებისა და საგანგებო
სიტუაციების მართვის დეპარტამენტი

აბსტრაქტი

ცნობილია, რომ გრძივი ვენტილაციის სისტემით აღჭურვილ საავტომობილო გვირაბებში ინიცირებული და განვითარებული ხანძრებისას ხშირ შემთხვევაში ადგილი აქვს „სავენტილაციო სისტემის გადაყირავებას“, რაც იმას ნიშნავს, რომ სავენტილაციო ჰაერის ნაკადი ვეღარ ახდენს ეფექტურ გავლენას წვის შედეგად წარმოქმნილ წვეის ძალებზე, აღნიშნულის შედეგად გვირაბის ორივე მხარე ინტენსიურად ივსება კვამლით და წვის პროდუქტებით, შედეგად აღნიშნული გარემო ადამიანის სიცოცხლისათვის საშიში და გამოუსადეგარი ხდება. ასეთ პირობებში აღმოჩენილი ადამიანების გადარჩენის ერთადერთ ეფექტურ შესაძლებლობად ორგანიზებული და დაუყოვნებელი თვითევაკუაცია განიხილება. თვითევაკუაციისათვის აუცილებელი დროის ხანგრძლიობა მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია ასეთ დახურულ სივრცეში ხანძრის განვითარებისა და ფორმირებული საშიში ფაქტორების გავრცელების დინამიკაზე. აღნიშნულის დასადგენად განვახორციელეთ 10, 30, 50 მგვტ. სიმძლავრის ხანძრის რიცხვითი მოდელირება FDS პროგრამულ გარემოში, გამოვიყენეთ სასრული მოცულობების მეთოდი. შევირჩიეთ გვირაბი სიგრძით 500 მ, ხოლო განივკვეთის ფართობი 42 მ². სასრული მოცულობის კონტურის მინიმალური ზომებია - 0,25 X 0,25 X 0,25 მ, ხოლო მაქსიმალური - 0,5 X 0,5 X 0,5 მ, ხანგრძლიობა 190 წმ, გვირაბის ცენტრში მდებარეობს 10-15 მ² ხანძრის კერა. რიცხვითი მოდელირების შედეგად დადგინდა იმ საშიში ფაქტორების მახასიათებლების გავრცელების დინამიკა, რომლებიც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს საევაკუაციო დროის ხანგრძლიობაზე და გვირების კონსტრუქციულ მდგრადობაზე.

დადგინდა 60 °C კრიტიკული ტემპერატურის, როგორც ერთ-ერთი საშიში ფაქტორის გავრცელების დინამიკა, მისი გავრცელების გეომეტრიული მახასიათებლები შესაბამისი სიმძლავრის ხანძრების შემთხვევაში. დადგინდა გვირაბის ვერტიკალურ სიბრტყეში ნახშირბადის მონოქსიდის საშიში

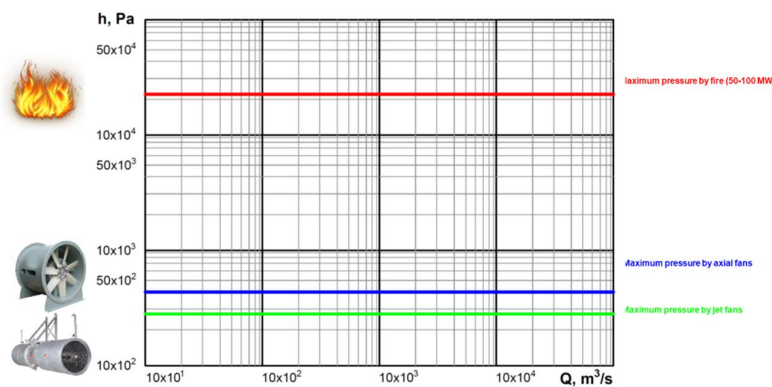
კონცენტრაციის 200 მგ/მ³, გავრცელების დინამიკა შესაბამისი სიმძლავრის ხანძრების შემთხვევაში.

საკვანძო სიტყვები: გრძივი ვენტილაცია, ხანძარი, რიცხვითი მოდელირება, კრიტიკული ტემპერატურა

1. შესავალი

საავტომობილო ტრანსპორტისათვის განკუთვნილი გვირაბების უსაფრთხო ექსპლუატაცია მნიშვნელოვან გამოწვევას წარმოადგენს მსოფლიოს გლობალურ სატრანსპორტო სისტემაში. აღნიშნულ ურთულეს ინფრასტრუქტურულ ნაგებობაში სხვადასხვა მიზეზებით ინიცირებული და განვითარებული ხანძრები, ერთ-ერთ არსებით საფრთხედ განიხილება, რომლებიც ხასიათდებიან ძირითადად ორი დამაზიანებელი ფაქტორით, ესენია: წვადი მასალის სრული ან არასრული წვის შედეგად გამოყოფილი დიდი რაოდენობის სითბო, რომელიც ანადგურებს ყველაფერს და მხუთავი აირები, რომელიც ძირითადად სახიფათო ზონაში ჩარჩენილი ადამიანების სიცოცხლისუნარიანობაზე ახდენს გამანადგურებელ გავლენას. ასეთ საგანგებო ვითარებაში აღმოჩენილი ადამიანების სიცოცხლის გადარჩენის ერთადერთი შესაძლებლობა არის ორგანიზებული თვითევაკუაციის განხორციელება, ეს უკანასკნელი კი დამოკიდებულია საევაკუაციო დროის ხანგრძლივობაზე, რომელიც კორელაციაშია ისეთ ფაქტორებთან, როგორებიცაა ინიცირებული ხანძრის განვითარების ინტენსიურობა, გვირაბის სავენტილაციო სისტემის შესაბამისი მუშაობის რეჟიმი, საევაკუაციო სივრცეების განლაგება და ა. შ. [1, 2].

გვირაბში ინიცირებული ხანძრისას გამოყოფილი მხუთავი აირების გავრცელების მაღალი ინტენსიურობა მნიშვნელოვნად ამცირებს თვითევაკუაციის დროის ხანგრძლივობას. შესაბამისად, აუცილებელია გვირაბის სავენტილაციო სისტემის მუშაობის სწორი რეჟიმის შერჩევა, რომელიც უზრუნველყოფს საჭირო, სუფთა ჰაერის მიწოდებას გვირაბის საევაკუაციო მიმართულებაზე, რაც ხელს შეუწყობს საევაკუაციო დროის გახანგრძლივებას.



ნახ. 1. გრძივი ვენტილაციის სისტემით აღჭურვილ გვირაბში მექანიკური და თერმული ნაკადების მახასიათებლების შედარება

აღნიშნული გაგრძელება, ხანძრის ინიცირებიდან ვიდრე, ხანძრის შედეგად აღძრული წვეის ძალების მიერ ფორმირებული ნაკადები არ მოიპოვებს უპირატესობას სავენტილაციო დანადგარების მიერ აღძრულ სუფთა ჰაერის ნაკადებზე, ანუ, სავენტილაციო სისტემის ე.წ. „გადაყირავებაამდე“. უნდა აღინიშნოს, რომ 50-100 მგვტ. სიმძლავრის ხანძრებისას წვის შედეგად ფორმირებული ნაკადების მახასიათებლები მნიშვნელოვნად აღემატება სავენტილაციო დანადგარების შესაძლებლობებს (ნახ. 1).

საავტომობილო გვირაბში ავტოსატრანსპორტო, ან სხვა შემთხვევის შედეგად ინიცირებული და განვითარებული ხანძრის სიმძლავრე დამოკიდებულია ავტომობილების ტიპზე და მათ რაოდენობაზე. აღნიშნული მახასიათებლები მოცემულია პირველ ცხრილში.

ცხრილი 1. ხანძრის სიმძლავრის დამოკიდებულება აღმოებულის ავტომობილების ტიპსა და რაოდენობაზე.

სატრანსპორტო საშუალების ტიპი	განვითარებული ხანძრის სიმძლავრე, მგვტ.	შენიშვნა
მსუბუქი ავტომობილი	2.5 – 5.0	სახანძრო დატვირთვები, რომელსაც იყენებენ სახანძრო გამოცდისას ფინეთში
ავტობუსი	20	სახანძრო დატვირთვები, რომელსაც იყენებენ სახანძრო გამოცდისას EUREKA
სატვირთო	20-30	
ტრაილერი	50	
ბენზინმზიდი ცისტერნით 50 მ³	300	მაღალი სიმძლავრის ხანძრების დონეები, რომელსაც იყენებენ ნიდერლანდების სამეფოში.

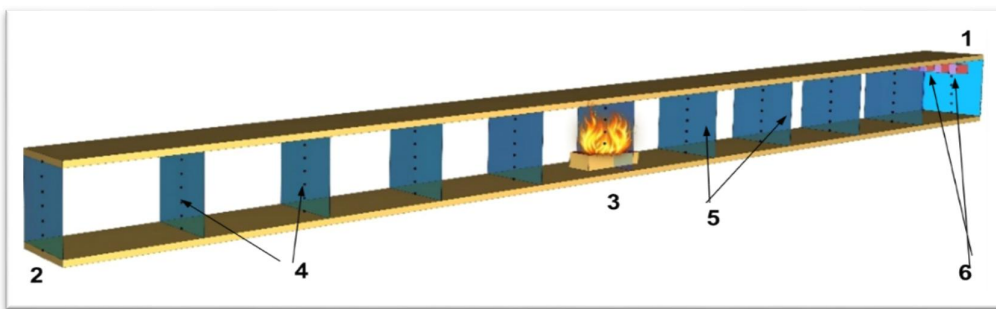
2. ცდის შედეგები და ანალიზი

ეფექტური თვითევაკუაციის დროის ხანგრძლივობა დამოკიდებულია გვირაბში ინიცირებული ხანძრის განვითარების ინტენსიურობაზე და საშიში ფაქტორების გავრცელების დინამიკაზე. ამის დასადგენად, განვახორციელეთ 10, 30, 50 მგვტ-იანი სითბოს გამოყოფის ინტენსიურობის ხანძრის რიცხვითი მოდელირება,

გამოყენებული იქნა მოცულობითი ბადური მეთოდი, CFD მოდელები და Fire Dynamics Simulator FDS პროგრამული უზრუნველყოფა.

შეირჩა 500 მეტრის სიგრძის გვირაბი, რომლის განივი ფართობია 42 მ^2 . სასრული მოცულობითი კონტურის მინიმალური ზომაა $0,25 \times 0,25 \times 0,25 \text{ მ}$, მაქსიმალური - $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ მ}$, მოდელირების ხანგრძლივობა - 190 წმ. , ხანძრის წყარო განისაზღვრა $10\text{--}15 \text{ მ}^2$ ფართობით და მდებარეობს გვირაბის ცენტრში.

ჰაერის მოძრაობის სიჩქარის დეტალური აღრიცხვისთვის გამოყენებული იქნა გაზომვის კომბინირებული მეთოდი, როდესაც რეგისტრაცია ხორციელდებოდა როგორც წერტილოვანი, ისე მოცულობითი საზომი მოწყობილობების მეშვეობით. ამასთან, წერტილოვანი მოწყობილობები განლაგდა გვირაბის ღერძულა ხაზის მართობულ სიბრტყეზე. ყოველ სიბრტყეში შვიდ-შვიდი ცალი ანალოგიური მოწყობილობა ერთმანეთისაგან 1 მ დაშორებით განლაგდა ისე, რომ პირველი მოწყობილობა განთავსდა იატაკის დონეზე. სიბრტყეებს შორის დაშორება ექსპერიმენტის მსვლელობისას შეადგენდა 10 მ . აღნიშნული მოცემულია ნახ. 2-ზე, ხოლო რიცხვითი მოდელირების შედეგები წარმოდგენილია მე-2 ცხრილში.



ნახ. 2. გვირაბის 100 მ მონაკვეთზე ჰავლური ვენტილატორებისა და საზომი მოწყობილობების განლაგება გვირაბის მოდელზე გრძივი ვენტილაციის დადგენილი სქემისათვის: 1 - ზედა პორტალი; 2 - ქვედა პორტალი; 3 - ხანძრის კერა; 4 - წერტილოვანი საზომი მოწყობილობები; 5 - მოცულობითი საზომი მოწყობილობები; 6 - ვენტილატორები

ცხრილი 2. გვირაბში ჰაერის ხარჯისა და სიჩქარის ცვალებადობა განვითარებული ხანძრის სიმძლავრის მიხედვით

ხანძრის სიმძლავრე მგვტ.	u_1 , მ/წმ	u_2 , მ/წმ	G_2 , $\text{მ}^3/\text{წმ}$	G_1 , $\text{მ}^3/\text{წმ}$	G , $\text{მ}^3/\text{წმ}$
10	2,9	4,1	139,2	196,6	57,6
30	2,9	5,0	139,2	240,0	100,8
50	2,9	5,6	139,2	268,6	129,6

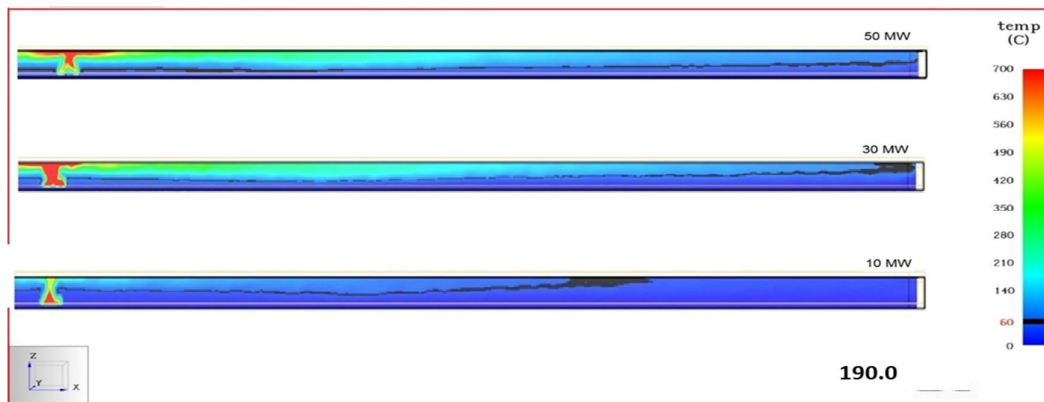
u_1 ჰაერის ნაკადის სიჩქარე გამოითვლება გვირაბის ზედა პორტალიდან ხანძრის კერამდე მანძილისა და აღნიშნული მანძილის დაფარვაზე დახარჯული დროის გათვალისწინებით. G_1 - შესაბამისად ჰაერის ხარჯი. u_2 არის ჰაერის ნაკადის სიჩქარე, რომელიც გამოითვლება ხანძრის კერიდან გვირაბის ქვედა პორტალამდე მანძილისა და ამ მანძილის დაფარვაზე დახარჯული დროის გათვალისწინებით. G_2 - შესაბამისად ჰაერის ხარჯი [3-5].

გვირაბში ხანძრის ინიცირებისას გამოყოფილი და გავრცელებული კვამლისა და სხვა დანარჩენი ტოქსიკური პროდუქტების რაოდენობა გამოითვლება ფორმულით:

$$G = G_2 - G_1 \quad (1).$$

გვირაბში განვითარებული ხანძრების დროს, ზღვრულ დამაზიანებელ ფაქტორებად განიხილება 60°C კრიტიკული ტემპერატურა და 200 მგ/მ^3 ნახშირბადის მონოქსიდი [6-9].

ექსპერიმენტის შედეგები 10, 30 და 50 მგვტ სიმძლავრის განვითარებული ხანძრებისას, დამაზიანებელი სითბური ფაქტორის 60°C კრიტიკული ტემპერატურის გავრცელების დინამიკა მოცემულია ნახ. 3-ზე.



ნახ. 3. გვირაბში განვითარებული 10, 30, 50 მგვტ ხანძრებისათვის დამაზიანებელი სითბური ფაქტორების გავრცელების დინამიკა 60°C კრიტიკული ტემპერატურის იზოთერმის დინამიური ცვლილების მიხედვით

ექსპერიმენტის შედეგად დავადგინეთ 60°C კრიტიკული ტემპერატურის იზოთერმის გავრცელების სიგრძე და სიმაღლე ხანძრის კერიდან შესაბამისად გვირაბის ჰორიზონტალურ (X) და ვერტიკალურ (Z) სიბრტყეებში მოცემულია მე-3 ცხრილში.

ცხრილი 3. მოდელირების შედეგები 60°C კრიტიკული ტემპერატურის იზოთერმის გავრცელების სიგრძე და სიმაღლე ხანძრის კერიდან შესაბამისად გვირაბის ჰორიზონტალურ (X) და ვერტიკალურ (Z) სიბრტყეებში

მოდელირების შედეგები 60°C კრიტიკული ტემპერატურის იზოთერმის გავრცელების სიგრძე და სიმაღლე ხანძრის კერიდან შესაბამისად გვირაბის ჰორიზონტალურ (X) და ვერტიკალურ (Z) სიბრტყეებში

ხანძრის სიმძლავრე, მგვტ.	ხანძრის კერიდან გვირაბის გასწვრივ გავრცელების მინიმალური მანძილი, (l_{min}) მ.	ხანძრის კერიდან გავრცელების მინიმალური სიმაღლე, (h_{min}) მ.
10	75	2
30	75	1
50	75	0,5

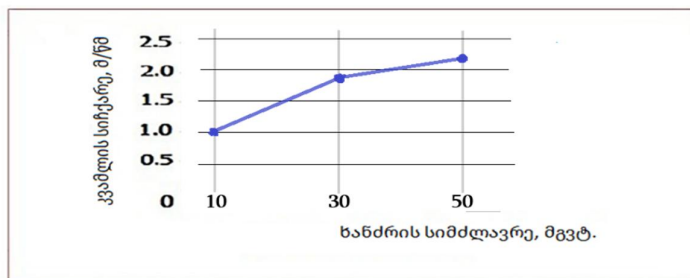
დავადგინეთ ხანძრის კერიდან ორივე მხარეზე, გვირაბის გასწვრივ 75 მ მანძილზე, გვირაბის იატაკიდან 2 მ სიმაღლეზე არსებული ჰაერის ტემპერატურის ცვალებადობა ხანძრის სიმძლავრის მიხედვით, შედეგები მოცემულია მე-4 ცხრილში.

ცხრილი 4. ჰაერის ტემპერატურის ცვალებადობა ხანძრის სიმძლავრის მიხედვით.

ხანძრის სიმძლავრე, მგვტ.	ხანძრის კერიდან ორივე მხარეზე, გვირაბის გასწვრივ 75 მ მანძილზე, ნულოვანი დონიდან 2 მ სიმაღლეზე არსებული ჰაერის ტემპერატურა, °C.
10	60
30	180
50	204

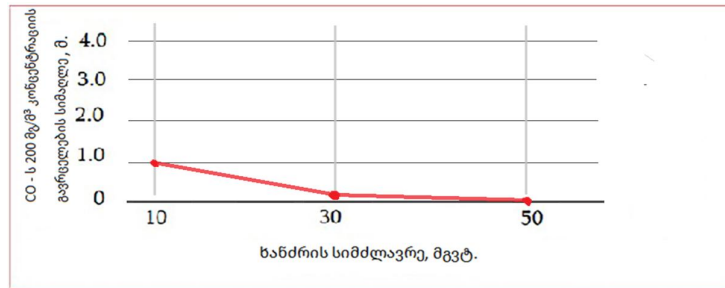
ჰორიზონტალური გვირაბის მოდელში, განისაზღვრა კვამლისა და ნაწივი პროდუქტების გავრცელების სიჩქარის ცვალებადობა ხანძრის სიმძლავრის მიხედვით ბუნებრივი ვენტილაციის პირობებში (როცა სავენტილაციო სისტემა გამორთულია), შედეგები წარმოდგენილია გრაფიკის სახით

ნახ. 4.



ჰორიზონტალური გვირაბის მოდელში, კვამლისა და ნაწივი პროდუქტების გავრცელების სიჩქარის ცვალებადობა ხანძრის სიმძლავრის მიხედვით ბუნებრივი ვენტილაციის პირობებში.

მოდელირების შედეგად დადგინდა ჰორიზონტალურ გვირაბებში, სადაც გამორთულია სავენტილაციო დანადგარები, ხანძრის ინიცირებისა და განვითარების დროს ფორმირებული, 200 მგ/მ³ კონცენტრაციის ნახშირბადის მონოქსიდის, გვირაბში ნულოვანი დონიდან სიმაღლეზე გავრცელების ცვალებადობა სხვადასხვა სიმძლავრის ხანძრებისათვის. შედეგები წარმოდგენილია მე-5 ნახაზზე.



ნახ. 5. ჰორიზონტალურ გვირაბებში ხანძრის განვითარების შედეგად ფორმირებული 200 მგ/მ³ კონცენტრაციის ნახშირბადის მონოქსიდის გავრცელება ბუნებრივი ვენტილაციის პირობებში.

3. დასკვნა

1. რიცხვითმა მოდელირებამ გამოავლინა საშიში ფაქტორების გავრცელების დინამიკა, რომლებიც მნიშვნელოვნად მოქმედებს გვირაბებიდან ადამიანების ევაკუაციის განხორციელების ხანგრძლივობასა და გვირაბის სტრუქტურულ სტაბილურობაზე. განისაზღვრა 60°C კრიტიკული ტემპერატურის, როგორც ერთ-ერთი ზღვრული სახიფათო ფაქტორის, გავრცელების დინამიკა და შესაბამისი ინტენსიურობის ხანძრების გავრცელების გეომეტრიული მახასიათებლები.

2. დადგინდა ნახშირბადის მონოქსიდის გავრცელების დინამიკა გვირაბის ვერტიკალურ სიბრტყეში 200 მგ/მ³ სახიფათო კონცენტრაციით სხვადასხვა ინტენსიურობის ხანძრებისთვის

3. მიღებული შედეგები სასარგებლოა ხანძრის დროს ოპერატიულ გვირაბებში ვენტილაციის სტრატეგიებისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის პროტოკოლების შემუშავებისთვის, რაც წარმოადგენს აუცილებელ სახელმძღვანელოს როგორც პერსონალის, ისე სამაშველო ჯგუფებისთვის.

წინამდებარე ნაშრომი მომზადებულია შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით. (გრანტის ნომერი: FR-22-12949, დასახელება: „კრიტიკული სიჩქარისა და ხანძრით გამოწვეული უკუდინების შესწავლა სიცოცხლის გადასარჩენად სავტომობილო გვირაბებში“).

გამოყენებული ლიტერატურა

1. O. Lanchava, N. Ilias, M. Jangidze, Z. Khokerashvili, S. M. Radu. Fire Development Study on Physical Models of Transport Tunnels. MATEC Web of Conferences 342, 03020 (2021) Petrosani, Romania, 2021. <https://doi.org/10.1051/mat ecconf/202134203020>
2. O. Lanchava, L. Makharadze, G. Nozadze, M. Jangidze, G. Javakhishvili, T. Kunchulia, Z. Khokerashvili, N. Arudashvili, D. Tsanava, S. Sebiskveradze. Saving lives in a road tunnel using transformable elements restricting the propagation of fire products. Georgian Scientists, 2022-03-02. <https://journals.4science.ge/index.php/GS/article/view/747>
3. O. Lanchava, N. Ratiani, Z. Khokerashvili, N. Arudashvili. Variation of Critical Velocity of Downward Ventilation in Inclined Road Tunnels. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2024. 10.5593/sgem2024/4.1/s19.
4. O. Lanchava, N. Ilias. Critical velocity analysis for safety management in case of tunnel fire. MATEC Web of Conferences 305, 00023, 2020.
5. O. Lanchava, N. Ilias. Some issues of thermal calculation of ventilation air for the metro. Journal of Engineering Sciences and Innovation 2(2), 2017.
6. Z. Khokerashvili. Analysis of Fire Development in a Road Tunnel Equipped with Transformable Elements by Using Numerical Modeling Method. 13 Annual International Meeting of the Georgian Mechanical Union. Batumi State Maritime Academy, Batumi, Georgia. August 24-26, 2022.
7. O. Lanchava, A. Bezhanishvili, G. Javakhishvili, Z. Khokerashvili, N. Arudashvili. Study of the Throttling Effect in Tunnel Fire. Inżynieria Mineralna, Vol. 1, no. 1, 2024, 385—393.
[DOI 10.29227/IM-2024-01-44](https://doi.org/10.29227/IM-2024-01-44)
8. O. Lanchava, G. Nozadze, N. Arudashvili, Z. Khokerashvili. To Determination of Ventilation Air of The Metro of Tbilisi by Thermal Factor. Georgian Scientists, Volume 3, Issue 1, 2021/6/10. <https://doi.org/10.52340/gS.02.21.283>
9. O Lanchava, G Nozadze, Z Khokerashvili, Numerical modeling of ventilation flow distribution in subway tunnels with considering of the piston effect. Georgian Scientists, Vol. 3 No. 1 (2021), <https://doi.org/10.52340/gS.02.21.283>

Analysis of Fire Development of Different Intensity in a Road Tunnel Using Numerical Simulation

Zaza Khokerashvili¹, Nino Ratiani¹, Nino arudashvili¹

¹Kostava Street 77 (Occupational Safety and Emergency Management Department, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia); E-mail: zaza196822@gmail.com

Abstract

It is known that in road tunnels equipped with longitudinal ventilation system, backlayering frequently occurs during the initiation and development of fires. This means that the ventilation airflow does not exert sufficient impact on the buoyant forces generated by the fire. As a result, a tunnel is intensively filled with smoke and other toxic combustion products, creating an environment incompatible with human survival and hazardous for human life. An organized and immediate self-evacuation is considered to be the only effective means to rescue people under such conditions. The time period for an effective self-evacuation is significantly dependent on the fire development in enclosed spaces, and the propagation dynamics of dangerous factors. In order to determine this, we have conducted a numerical modeling of 10, 30, 50 MW heat release intensity fire within the FDS program. The Finite Volume Method was applied. A 500-m-long tunnel was selected, with the cross-sectional area of 40-42 m². The minimum size of the finite volume outline - 0,25X0,25X0,25 m, maximum - 0,5 X 0,5 X 0,5 m, modeling duration – 190 sec., the fire source, with an area of 10–15 m², is located at the center of the tunnel. The modeling was carried out using four types of fuel: petrol, diesel, kerosene, and log wood. The thesis underlines that the dynamic pressure induced by a severe fire significantly exceeds the static pressure of the tunnel jet fans. Hence, after the algebraic summation of the positively directed ventilation flows and the negatively directed flows caused by the fire, intense backlayering occurs, which must be taken into account when implementing emergency ventilation projects. The numerical modeling revealed the dynamics of the spread of hazardous factors features, which significantly impact the evacuation duration and the structural stability of tunnels.

The dynamics of the spread of the critical temperature of 60°C, as one of the hazardous factors, were determined, along with its geometric parameters of propagation in fires of corresponding intensity. Additionally, the propagation dynamics of carbon monoxide at a hazardous concentration of 200 mg/m³ in the tunnel's vertical plane were established for fires of appropriate intensity. The obtained results are instrumental in formulating ventilation strategies and emergency management protocols in operational tunnels when fires occur, serving as essential guidance for both personnel and rescue teams.

Keywords: Longitudinal ventilation, Fire, Numerical modeling, Critical temperature

Acknowledgments

This work was funded by the Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia [Grant No. FR-22-12 949]. Title: "Study of Critical Velocity and Fire-Induced Backlayering Life-saving Strategies in Road Tunnels."