

გვირაბის ხანძრის პირობებში სავენტილაციო სისტემის ეფექტიანობისა და სიცოცხლის გადარჩენის ინტეგრირებული ანალიზი

ომარ ლანჩავა

პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

რეზიუმე

კვლევაში ნაჩვენებია, რომ სავენტილაციო სისტემები, მიუხედავად იმისა, რომ აუცილებელია, არ არის საკმარისი იმისათვის, რომ უზრუნველყოს სიცოცხლის უსაფრთხოება გვირაბის ხანძრებში. შემოთავაზებულია ახალი მეთოდოლოგიური მიდგომა, რომელიც ხაზს უსვამს დინამიური ეფექტურობის კოეფიციენტის (DEF) მნიშვნელობას - ინტეგრირებულ პარამეტრს, რომელიც აფასებს ხანძრის დინამიკის, ვენტილაციის ეფექტურობისა და ადამიანის ევაკუაციის რისკების ერთობლივ გავლენას. DEF კონცეფცია წარმოგვიდგენს ყოვლისმომცველ ჩარჩოს, რომელიც აკავშირებს ტექნიკურ მუშაობას ადამიანის ქცევის მოდელებთან საგანგებო სიტუაციებში.

გამოთვლითი სითხის დინამიკის (CFD) მოდელირება გამოიყენება ხანძრის განვითარების, ტემპერატურის გრადიენტების, კვამლის გავრცელებისა და ტოქსიკური აირის დისპერსიის მოდელირებისთვის. ანალიზი აჩვენებს, რომ მიუხედავად იმისა, რომ ფრუდის რიცხვი კვლავ რჩება ვენტილაციის მუშაობის შეფასების მნიშვნელოვან ინდიკატორად, რეალურ სცენარებში ის მნიშვნელოვნად თმობს პოზიციებს. ამრიგად, მხოლოდ ფრუდის რიცხვზე დაყრდნობამ ადაპტური კორექტირების გარეშე შეიძლება გამოიწვიოს ხანძრის საგანგებო სიტუაციების არასაკმარისი დაგეგმვა.

ამ კვლევაში განხილული ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევაა CFD მოდელების ინტეგრაცია ევაკუაციის მოდელირებებთან. მოდელებს შორის დროითი და სივრცითი გარჩევადობის განსხვავებები ართულებს ინტეგრაციის პროცესს, თუმცა ამ სირთულეების გადალახვა აუცილებელია რისკის ზუსტი შეფასებისთვის. ნაშრომში წარმოდგენილია კონკრეტული პრაქტიკული მაგალითები და გამოკვეთილია სტრატეგიული რეკომენდაციები ეფექტური, კომბინირებული მოდელირების მეთოდოლოგიების შესაქმნელად.

საბოლოო ჯამში, კვლევა ადასტურებს, რომ საიმედო ხანძარსაწინააღმდეგო უსაფრთხოების სისტემის მიღწევას მხოლოდ მექანიკური მოწყობილობები არ ყოფნის. საკითხი მოითხოვს კარგად შემუშავებულ პროცედურებს, დახვეწილ საინჟინრო მიდგომებს, ძლიერ მართვის სტრატეგიებს და ადამიანური ფაქტორების გულდასმით გათვალისწინებას. ასეთი მრავალფაქტორიანი და დინამიური ჩარჩოს გამოყენებით, გვირაბის ხანძრებთან

დაკავშირებული საგანგებო დაგეგმვა შეიძლება გახდეს უფრო მდგრადი და ეფექტური, რაც გაზრდის როგორც სტრუქტურულ უსაფრთხოებას, ასევე ადამიანების გადარჩენის პერსპექტივებს.

საკვანძო სიტყვები: ხანძრის CFD მოდელები; ევაკუაციის მოდელები; მოდელების ინტეგრაცია; დინამიური ეფექტურობის კოეფიციენტი; ფრუდის რიცხვი.

მნიშვნელოვანი მიგნებები:

- ვენტილაცია მხოლოდ ნაწილობრივ უზრუნველყოფს უსაფრთხოებას: სავენტილაციო სისტემის ეფექტიანობა აუცილებელია, თუმცა არასაკმარისია სიცოცხლის გადარჩენისთვის.
- დინამიური ეფექტიანობის ფაქტორი (DEF): წარმოდგენილია ახალი ინტეგრირებული მიდგომა, რომელიც ითვალისწინებს ხანძრის დინამიკას, სავენტილაციო შესაძლებლობებსა და ევაკუაციის რისკებს.
- ფრუდის რიცხვი ცვალებადია ხანძრის რეალურ სცენარებში: მის საფუძველზე შექმნილი მოდელები საჭიროებს დახვეწას და კორექტირებას პრაქტიკული გამოყენებისთვის.
- CFD და ევაკუაციის მოდელების ინტეგრაცია გამოწვევას წარმოადგენს: სხვადასხვა დროითი და სივრცითი სიზუსტის გამო მათი სინქრონიზაცია რთულია, თუმცა აუცილებელი.

1. შესავალი

საავტომობილო გვირაბებში ხანძარი წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე რთულ უსაფრთხოების გამოწვევას დახურულ ინფრასტრუქტურულ გარემოში. ისტორიულმა ტრაგედიებმა, როგორებიცაა მონბლანის, ტაუერნის, სენ-გოტარდისა და სხვა გვირაბების ხანძრები, ნათლად აჩვენა, რომ ხანძრის ეფექტური მართვა და ადამიანების უსაფრთხო ევაკუაცია არ შემოიფარგლება მხოლოდ სავენტილაციო სისტემით [1]. გარდა ვენტილაციისა, უსაფრთხოების ეფექტიანობა დამოკიდებულია დანარჩენი ინფრასტრუქტურული სისტემებისა და ელემენტების კოორდინირებულ მუშაობაზე. მათ შორის აღსანიშნავია: ევაკუაციის მარშრუტები, ხანძარმედეგი კონსტრუქციები, დეტექციის ტექნოლოგიები და ცეცხლთან ბრძოლის აქტიური და პასიური მეთოდები.

ტრადიციულად, გვირაბის სავენტილაციო სისტემა იგეგმება კრიტიკული სიჩქარის კონცეფციაზე დაყრდნობით, რომელიც გამომდინარეობს ფრუდის რიცხვისაგან და მიზნად ისახავს კვამლისა და წვის სხვა ტოქსიკური პროდუქტების უკუდინების თავიდან აცილებას. თუმცა, ბოლო წლებში ჩატარებულმა ექსპერიმენტულმა და რიცხვითმა კვლევებმა აჩვენა, რომ რეალურ პირობებში, განსაკუთრებით დახრილ გვირაბებში დაღმავალი გრძივი ვენტილაციისას, ან ინტენსიური თბოგამოყოფის პირობებში, აღნიშნული კრიტიკული სიჩქარე ხშირად ვერ უზრუნველყოფს უკუდინების თავიდან აცილებას.

წინამდებარე კვლევა ერთიან სისტემაში განიხილავს თბოგამოყოფის, სავენტილაციო სისტემის მუშაობის ეფექტიანობისა და ადამიანის სიცოცხლის გადარჩენის ურთიერთკავშირს

ხანძრის სხვადასხვა სცენარებში. წარმოდგენილია ახალი კომპლექსური შეფასების მოდელი, რომელიც ეფუძნება დინამიკური ეფექტიანობის ფაქტორების (დეფ) ინტეგრირებულ ანალიზს, რომელიც ითვალისწინებს როგორც ხანძრის დინამიკას, ასევე სავენტილაციო შესაძლებლობებს და ადამიანებზე ზემოქმედების რისკებს. მოდელი იძლევა სიცოცხლის უსაფრთხოებისა და სისტემური მდგრადობის უფრო ზუსტ შეფასებას შეზღუდულ მიწისქვეშა გარემოში.

გვირაბებში უკვე მომხდარი ხანძრების კერაზე ტემპერატურა აღწევდა 1300-დან 1650K-მდე. სამიტის გვირაბში (დიდი ბრიტანეთი) მომხდარი ხანძრის დროს ტემპერატურა იყო 1500 °C, ხოლო აგურის სამაგრი 10-15 მმ სისქის მდნარი მასით დაიფარა [1].

საავტომობილო გვირაბებში მომხდარი ძლიერი ხანძრებიდან აღსანიშნავია: - იაპონიის „ნიჰომაკას“ გვირაბში მომხდარი ხანძარი, რაც განვითარდა 1979 წელს მანქანების შეჯახების შედეგად, ხანძარი მძვინვარებდა 4 დღე-ღამის განმავლობაში და მისი ლოკალიზაცია მოხერხდა მხოლოდ მას შემდეგ, რაც გვირაბში ყველა სახის წვადი მასალა ამოიწურა; - აშშ-ის „კალდეკოტის“ გვირაბში 1982 წელს, ნასვამი მძღოლის მიზეზით მომხდარ ავარიას მოჰყვა ძლიერი ხანძარი, დაიღუპა 7 ადამიანი; - საფრანგეთში დასახლებულ პუნქტ Beaun-თან 1982 წელს მომხდარი ხანძრის დროს დაიღუპა 53 ადამიანი, მათ შორის 44 ბავშვი; - საფრანგეთ-იტალიის „მონბლანის“ გვირაბის ხანძარი 1999 წელს, ხანძარი გაჩნდა ავტომანქანის ძრავაში, მძღოლმა ვერ შეძლო რა მისი ჩაქრობა, მიატოვა მანქანა და ფეხით წავიდა იტალიის მიმართულებით, სანამ გვირაბის დირექცია დაკეტავდა გვირაბს, ყველა მანქანა, რომელიც შევიდა საფრანგეთის მხრიდან მოჰყვა ხანძრის ტოქსიკური პროდუქტების გავლენის არეალში და არავინ არ გადარჩენილა, ხოლო იტალიის მხრიდან შესულ მანქანებში ყველა გადარჩა, ტოქსიკური აირები ვრცელდებოდა იტალიის მიმართულების პორტალიდან საფრანგეთის მხარეზე 1 მ/წმ სიჩქარით, მძვინვარებდა 53 საათის განმავლობაში, 5 დღის განმავლობაში ხანძრის ჩაქრობის შემდეგ ცხელი აირები გამოდიოდა გვირაბიდან ბუნებრივი წევით, 40 ადამიანი, მათ შორის 1 მეხანძრე დაიღუპა, მოცემული გვირაბისათვის ეს იყო რიგით მე-18 და ყველაზე ძლიერი ხანძარი 1965 წლიდან; - ავსტრიის ტაუერნის გვირაბში 1999 წელს მომხდარი ხანძარი ავტომანქანების შეჯახების შედეგად, გრძელდებოდა 15 სთ-ის განმავლობაში; - შვეიცარიის „გოტარდის“ გვირაბში მომხდარი ხანძარი 2001 წელს, რომელიც გაჩნდა ავტომანქანების შეჯახების შედეგად, გრძელდებოდა 20 სთ-ის განმავლობაში [2].

საზოგადოების დიდი ყურადღება მიიქცია მე-20 საუკუნის ბოლოს და 21-ე საუკუნის დასაწყისში მომხდარმა ხანძრებმა ჟურნალისტების აქტიურობის შედეგად. გარდა ზემოაღნიშნული ხანძრებისა, აღნიშნულზე დიდი გავლენა მოახდინა აგრეთვე სხვა სატრანსპორტო გვირაბებში მომხდარმა ხანძრებმა. კერძოდ, ბაქოს მეტროში 1995 წელს მომხდარმა ძლიერმა ხანძარმა რომლის დროსაც დაიღუპა 200-ზე მეტი ადამიანი, 2003 წელს სამხრეთ კორეის დაეგუს მეტროში ბოროტი განზრახვით გაჩენილმა ხანძარმა, რომლის დროსაც დაახლოებით 200 ადამიანი დაიღუპა. ავსტრიის ქალაქ კაპრუნის ინციდენტი 2000 წელს, როცა ფუნიკულორის მატარებელში ხანძრის შედეგად 151 ადამიანი დაიღუპა, იმავე ხანძარმა იმსხვერპლა შემხვედრი მატარებლის მემანქანე და ზედა პორტალთან ტრანსპორტის მომლოდინე 3 ადამიანი.

აღნიშნული დიდი ყურადღების ნიშანია გაეროს ევროპულ კომისიაში საერთაშორისო ექსპერტების ჯგუფის შექმნა, რომლებსაც ხელმძღვანელობდნენ ევროკავშირის წევრი

ქვეყნების ტრანსპორტის მინისტრები განრიგით. აღნიშნული ჯგუფი ამზადებდა და პერიოდულად გამოსცემდა სათანადო დოკუმენტებს, რომელთა მცირე ნაწილი მოცემულია ლიტერატურაში [2-11].

გვირაბის ხანძარი ღია ხანძრისაგან მინიმუმ ორი მნიშვნელოვანი განსხვავებით ხასიათდება: 1. წვადი მანქანებისაგან გამოყოფილი სითბო უფრო მეტად საგრძნობია მიწისქვეშ, რადგან სივრცე ჩაკეტილია და წვის პროდუქტების დისიპაცია შედარებით ნაკლებია; 2. შესაძლებელია ნაკადის უკუდინების წარმოქმნა, რაც ცვლის ვენტილაციის სქემას და ხშირ შემთხვევაში იწვევს მის კოლაფსს [12-18].

ღია ადგილებისაგან განსხვავებით, გვირაბში ჟანგბადი ყოველთვის არ არის საკმარისი და ამიტომ გვხვდება ორი ტიპის ხანძარი: ა) საწვავით კონტროლირებადი ხანძარი (სკხ) და ბ) ვენტილაციით კონტროლირებადი ხანძარი (ვკხ). სკხ-ის შემთხვევაში ჰაერის რაოდენობა ბევრია და ხანძრის სიმძლავრეს (სითბოს, კვამლის, ტოქსიკური ნაერთების რაოდენობას) განაპირობებს საწვავის რაოდენობა. ასეთი ხანძრის პირობებში, ჰაერის დიდი რაოდენობის გამო, წვის პროდუქტების კონცენტრაცია ჰაერში დაბალია. ვკხ-ის შემთხვევაში ხანძრის სიმძლავრეს განაპირობებს ჰაერის ხარჯი, რადგან ამ დროს საწვავის რაოდენობა დიდია. ამ შემთხვევაში წვის პროდუქტების კონცენტრაცია მაღალია და შესაძლებელია წარმოიქმნას აქროლადების აფეთქება-საშიში კონცენტრაცია.

ამგვარად, იმისდა მიუხედავად, გვირაბში წვა მიმდინარეობს ბუნებრივი, თუ ხელოვნური ვენტილაციის პირობებში, ყოველთვის გვხვდება ორი ტიპის ხანძარი: საწვავით კონტროლირებადი და ვენტილაციით კონტროლირებადი.

2. ხანძრის მიერ აღძრული დინამიკური წნევა

გვირაბებში ხანძრის დროს თბური რადიაციის გამო სავენტილაციო ჰაერი სწრაფად თბება და ფართოვდება. აღნიშნულის ხელშეწყობი ფაქტორია აგრეთვე წვის ტოქსიკური ცხელი აირების შერევა სუფთა ჰაერში. ფრუდის თეორიის მიხედვით ხანძრის კერაზე სუფთა ჰაერისა და წვის პროდუქტების შერევა თანაბარი რაოდენობით ხდება. თერმოდინამიკური დამოკიდებულების მიხედვით, დახურულ სივრცეში თერმული გაფართოებით გამოწვეული წნევის ცვლილება შეიძლება მიახლოებით შემდეგი თანაფარდობით

$$\Delta P \approx \frac{\rho_0 \cdot R \cdot \Delta T}{V} \quad (1)$$

სადაც ρ_0 არის საწყისი ჰაერის სიმკვრივე, კგ/მ³; R — აირის სპეციფიკური მუდმივა, ჯ/(კგ·K); V — კუთრი მოცულობა, მ³; ΔT — წვის შედეგად ტემპერატურის მატება, K.

ეს ფორმულა აჩვენებს, რომ თბოგამოყოფის შედეგად წარმოქმნილი ტემპერატურის გრადიენტი პირდაპირ იწვევს წნევის მატებას, რომელიც აამოძრავებს აიროვან გარემოს მასში წნევის გრადიენტის აღძვრის გამო.

უფრო ზუსტი წარმოდგენა წნევის ზემოქმედებაზე მიიღება, თუ წნევას გაფართოებული ჰაერის ტივტივადობით გამოწვეულ ინდუცირებულ სიჩქარედ განვიხილავთ, რაც აისახება დინამიკური წნევის მეშვეობით

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \rightarrow v = \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho} \quad (2)$$

სადაც ρ არის ჰაერის ნარევის სიმკვრივე (დამოკიდებული ტემპერატურასა და შედგენილობაზე), კგ/მ³; ν — საბოლოო სიჩქარე. ტივტივადობით გამოწვეული მოძრაობა მნიშვნელოვნად იზრდება დიდი ხანძრების დროს (როცა თბოგამოყოფა > 30 მგვტ) და ხშირად აჭარბებს ვენტილატორების მიერ წარმოქმნილ მექანიკურ ნაკადს. შესაბამისად, ხანძარი ქმნის წნევით და ნაკადურ ველს, რომელიც აძლიერებს, ან ასუსტებს სავენტილაციო სისტემის ეფექტიანობას იმისდა მიხედვით თუ როგორია სავენტილაციო ნაკადი (აღმავალი თუ დაღმავალი) და გვირაბის დახრილობა.

ძალიან მნიშვნელოვანი ფაქტორია გვირაბის დახრილობა. თუ გვირაბი დახრილია, გრავიტაციული კომპონენტი მოქმედებს ცხელი აირების ნაკადის მიმართულებით და აძლიერებს ამომგდებ ძალას (ტივტივადობის ეფექტს). ეს ზემოქმედება თბოგამოყოფის, გვირაბის გეომეტრიისა და გრავიტაციის ერთობლივი შედეგია და განსაზღვრავს ნაკადის ხასიათს. დახრილობა შესაძლოა მნიშვნელოვნად ცვლიდეს კვამლისა და ცხელი აირის მოძრაობის მიმართულებასა და ინტენსიურობას, მაშინაც კი, როცა სავენტილაციო სისტემა თეორიულად საპირისპირო მიმართულებით უნდა მოქმედებდეს.

სავალდებულოა აღვნიშნოთ, რომ მექანიკური სავენტილაციო სისტემები აღძრავენ ნაკადს ელექტროძრავის მეშვეობით, მაგრამ მათი ძალა შეზღუდულია — ვენტილატორები მოქმედებენ გარკვეული ეფექტიანობით, ხოლო აირის სიმკვრივე გავლენას ახდენს წნევისა და სიჩქარის გენერირების შესაძლებლობაზე. როცა ხანძრის მიერ წარმოქმნილი დინამიკური წნევა აღემატება სავენტილაციო ვენტილატორების წნევას, სისტემა ვეღარ ასრულებს ნაკადის მართვის ფუნქციას.

ამიტომ მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ სავენტილაციო სისტემა ასეთ შემთხვევებში აღარ არის „დამოუკიდებელი“ და „მთავარი“ ფაქტორი, არამედ წარმოადგენს წნევის სხვადასხვა წყაროს ურთიერთქმედების ნაწილს: სავენტილაციო სისტემა აძლევს ენერგიას (დადებითი წვლილი), ხანძარი ან ამატებს, ან აკლებს (მიმართულების მიხედვით), ხოლო გვირაბის დახრილობა მთლიანად ცვლის სისტემას. ეს მიდგომა იძლევა სავენტილაციო სისტემის თანამედროვე გაგებას, სადაც არა მხოლოდ კრიტიკული სიჩქარე, არამედ ნაკადის საერთო დინამიკური ბალანსია მნიშვნელოვანი.

ჯამში, თბოგამოყოფა არის ძირითადი საწყისი პარამეტრი, რომელიც განსაზღვრავს არა მხოლოდ გვირაბის სითბურ დატვირთვას, არამედ ნაკადურ მექანიკას, წნევით განსხვავებებს და სავენტილაციო სისტემის ეფექტიანობას. პრაქტიკული პროექტირებისას აუცილებელია გავითვალისწინოთ, როგორ იმოქმედებს ხანძრის დინამიკური წნევა სავენტილაციო სისტემასთან ურთიერთქმედებაში და მისცემს თუ არა სისტემა უსაფრთხო ევაკუაციის საშუალებას.

3. სავენტილაციო სისტემის კოლაფსი

სამეცნიერო მიმოქცევაში შემოტანილი გვაქვს ძლიერი ხანძრების კვლევის ამოსავალი პრინციპი, რაც ისაა, რომ ხანძრის პირობებში, გარკვეული პერიოდის შემდეგ, ვენტილატორების მუშაობა სავენტილაციო ნაკადზე გავლენას ვეღარ ახდენს იმისდა მიუხედავად, თუ რა მიმართულებით წავა მაღალი ტემპერატურის გავლენა: ეს იქნება ხანძრით გამოწვეული დინამიკური წნევის გაზრდა, ჰაერის სიმკვრივის შემცირება, თუ ორივე

ერთად. მაშასადამე, კოლაფსი არის ძლიერი და სწრაფად განვითარებადი ხანძრის შედეგად გვირახის სავენტილაციო სისტემის დეპრესიის თანაზომადი დომინანტური დინამიკური წნევის აღმშრისა და გავრცელების პროცესი [18-21, 24-33]. აღსანიშნავია, რომ ხანძრის მიერ აღმშრული დინამიკური წნევა ვენტილატორის მიერ განვითარებულ წნევასთან ალგებრულად იკრიბება.

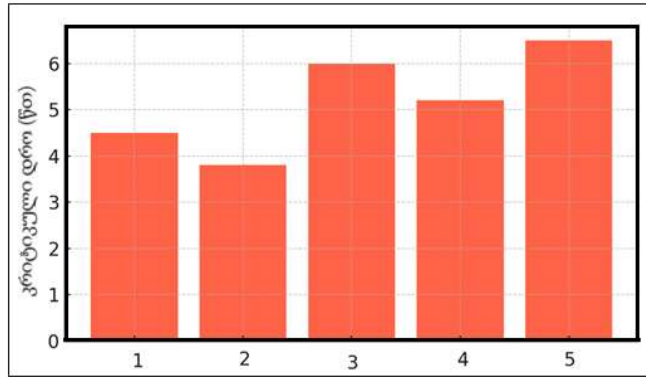
კოლაფსთან ძალიან ახლოსაა FDS მოდელირებით მიღებული შედეგი, რომელიც მოცემულია ნაშრომში [22], სადაც კერძოდ აღნიშნულია, რომ ხანძარს აქვს ტენდენცია შეეწინააღმდეგოს სავენტილაციო ჭავლის გავრცელებას, რაც უფრო დიდია ხანძარი, მით უფრო მეტია წინაღობა. ცხადად არის ნაჩვენები, რომ სულ უფრო მეტი ჭავლური ვენტილატორი არის საჭირო წვის პროდუქტების გვირახიდან ასარინებლად ხანძრის ზრდის კვალობაზე. ნაშრომში [23] აღნიშნულია, რომ გვირახში ხანძრის კერაზე აეროდინამიკური წინაღობა 6-ჯერ მაინც იზრდება.

4. დამაზიანებელი ფაქტორების ზღვრული დონეები (ზღურბლები)

ხანძრის სცენარებში სხვადასხვა დამაზიანებელი ფაქტორები განსხვავებულად ქმნიან სახიფათო სასიცოცხლო პირობებს მიწისქვეშ. ზოგიერთი დამაზიანებელი ფაქტორი, მაგალითად კვამლიანობა, შედარებით სწრაფად ვითარდება და აღწევს კრიტიკულ ზღურბლს. ევაკუაციის სცენარები უნდა ითვალისწინებდნენ ყველაზე სწრაფად მიღწევად დამაზიანებელი ფაქტორის ზღურბლს. ძირითად დამაზიანებელ ფაქტორებად განიხილება ტემპერატურა, ხილვადობის დეფიციტი კვამლის გამო, ტოქსიკური აირები, წნევის დინამიკური ზრდა, კუმულაციური ტოქსოდოზა. კუმულაციური ტოქსოდოზა განიმარტება როგორც დამაზიანებელი ფაქტორის განმეორებითი ზემოქმედება ადამიანზე. კრიტიკული ზღურბლების რიცხვითი სიდიდეები და მათი დადგომის დრო მოცემულია ცხრილში 1 და ფიგ. 1-ზე.

ცხრილი 1. კრიტიკული ზღურბლები და დრო დამაზიანებელი ფაქტორების მიხედვით

დამაზიანებელი ფაქტორი	კრიტიკული ზღურბლი	კრიტიკული დრო, წთ
ტემპერატურა	$> 60^{\circ}\text{C}$	4.5
ხილვადობა	$< 10 \text{ მ}$	3.8
CO-ს კონცენტრაცია	$> 500 \text{ ppm}$	6.0
დინამიკური წნევა	$> 150 \text{ პა}$	5.2
კუმულაციური ტოქსოდოზა (კტ)	$\text{კტ} > 1$	6.5



ფიგ. 1. კრიტიკული ზღურბლები და თითოეული ფაქტორის დადგომის დროის შუალედი:

1 - ტემპერატურა; 2 - ხილვადობა; 3 – CO კონცენტრაცია; 4 - დინამიკური წნევა; 5 - კუმულაციური ტოქსოდოზა

როგორც წარმოდგენილი მასალიდან ჩანს, სახანძრო უსაფრთხოება საავტომობილო გვირაბში დაფუძნებულია მრავალფაქტორიან ანალიზზე. აღსანიშნავია, რომ ყველა დამაზიანებელ ფაქტორს აქვს საკუთარი კრიტიკული ზღურბლი და ევაკუაციის სტრატეგია გაანგარიშებული უნდა იყოს იმ ფაქტორზე, რომელსაც აქვს გამოვლინების ყველაზე ნაკლები დროის შუალედი. ამგვარად, ამ მოცემული მასალის თანახმად, ევაკუაცია უნდა დასრულდეს 3,8 წთ-ის განმავლობაში, რაც შესაბამისობაშია NFPA 130 /502 და ISO 13571-ის რეკომენდაციებთან.

ნიშანდობლივია, რომ ფიგ. 1-ზე მოცემულ მასალაში მითითებული არ არის ხანძრის სიმძლავრე და ნაჩვენებია მხოლოდ კრიტიკული ზღურბლების დადგომის დრო. ამით ნაჩვენებია, რომ ხანძრის საბოლოო სიდიდე ამ შემთხვევაში საინტერესო არაა, რადგან ნებისმიერი სიმძლავრის ხანძარი გადის საწყის ფაზას, როცა თანდათანობით დგება კრიტიკული ზღურბლები.

5. CFD მოდელირება გვირაბის ხანძრის სცენარებისთვის

გვირაბებში ხანძრის დროს წარმოქმნილი თერმული და ტოქსიკური გარემოს კონტროლი წარმოადგენს უმნიშვნელოვანეს საინჟინრო ამოცანას. მექანიკური ვენტილაცია გამოიყენება თერმული ენერგიის, კვამლისა და ტოქსიკური აირების გვირაბიდან ასარინებლად, რაც კრიტიკულია ადამიანების ევაკუაციისა და უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად. ხანძრის სიმძლავრის (HRR), ვენტილაციის სტრატეგიისა და გვირაბის გეომეტრიის ზეგავლენის შესაფასებლად გამოიყენება დენად გარემოთა გამოთვლითი დინამიკა, ანუ რიცხვითი CFD-მოდელირება. იგი ეფუძნება ნავიე-სტოქსის განტოლებებს და ენერგიის მუდმივობის პრინციპს, რაც იძლევა საშუალებას, პროგნოზირებულ იქნას ტემპერატურის, სიჩქარისა და წნევის ველები.

ქვემოთ მოცემულ მოდელირების შედეგებში განიხილება სამი სავენტილაციო სცენარი, რომლებიც ეფუძნება რეალისტური გვირაბის პარამეტრებს: სიგრძე – 800 მ, დახრილობა – 3%, ვენტილატორების წნევა – 2000 პა, და ხანძრის სიმძლავრე – 30 მგვტ. გვირაბში შერჩეულია 8 ცალი განივი კვეთი ერთმანეთისაგან 100 მ დაშორებით. აღნიშნულ კვეთებში სცენარების მიხედვით დამონტაჟებულია 1, 2 ან 4 ცალი ჰავლური ვენტილატორი. ყველა მათგანი

მოქმედებს ინდივიდუალურად და ნაკადს მიმართავს დადმავალი მიმართულებით. ამგვარად, სცენარების მიხედვით გვირაბში ერთდროულად მოქმედებს 8, 16 და 32 ცალი ჭავლური ვენტილატორი.

ტემპერატურის საზომი სენსორები განლაგებულია გვირაბის ჭერს ქვემოთ 0,1 მ მანძილზე და აგრეთვე 1.7 მ სიმაღლეზე გვირაბის იატაკიდან, რაც ადამიანის სუნთქვის დონეს შეესაბამება. შეფასებას ექვემდებარება შემდეგი ზღვრული ფაქტორები:

- ტემპერატურა $> 60^{\circ}\text{C}$ (დაზიანების ზღვარი ადამიანისთვის);
- თერმული ნაკადი $> 2.5 \text{ კვტ/მ}^2$ (სტრუქტურული მასალების დაზიანების ზღვარი);
- CO კონცენტრაცია $> 500 \text{ ppm}$;
- ხილვადობა $< 10 \text{ მ}$.

ხანძრის სიმძლავრის გაზრდასთან ერთად იზრდება ჰაერის სიმკვრივის შემცირებით აღძრული თერმული ნაკადი, რომელიც ეწინააღმდეგება მექანიკურ ვენტილაციას. ეს გამოხატულია ფრუდის რიცხვის კლებით, რაც მიუთითებს მექანიკური ნაკადის შესუსტებაზე თერმულ ნაკადთან შედარებით. როდესაც $Fr < 1$, თბური ნაკადი დომინანტურია. მაღალი HRR ($> 20 \text{ MW}$) მნიშვნელოვნად ამცირებს დაყენებული ვენტილატორების ეფექტურობას.

აღსანიშნავია გამოწვევა ხანძრის დროს ვენტილაციის მუშაობის ზუსტი შეფასების შესახებ. არასწორი შეფასებები არ შემოიფარგლება მხოლოდ არაკვალიფიციური პირებით - ისინი შეიძლება ასევე მოხდეს მაღალკვალიფიციურ ექსპერტებს შორის. საილუსტრაციო მაგალითია შვეიცარიაში სენ-გოტარდის გვირაბში მომხდარი ხანძარი, რომელიც გაეროს მიერ დანიშნულმა ექსპერტთა ჯგუფმა გააანალიზა [3, 7].

ანგარიშში აშკარა წინააღმდეგობაა: მე-8 პუნქტში აღნიშნულია, რომ „გვირაბის ყველა მოწყობილობა, როგორებიცაა საგანგებო განათება, ვენტილაცია და მოძრაობის მართვა, ფუნქციონირებდა გეგმის მიხედვით და ეფექტურად“.

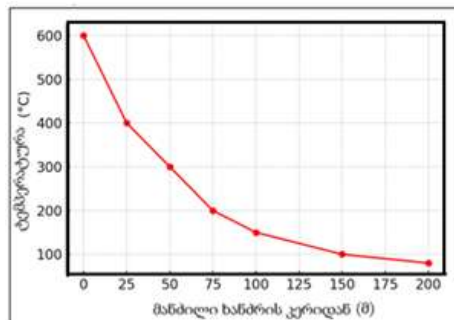
თუმცა, მე-9 პუნქტში აღნიშნულია, რომ „ყველა 11 მსხვერპლი გარდაიცვალა ტოქსიკური კვამლის შესუნთქვის შედეგად“, რომელთაგან ბევრი იპოვეს საკუთარი მანქანების საჭესთან, ხანძრიდან 1-2 კილომეტრის დაშორებით.

ეს მკვეთრი შეუსაბამობა კრიტიკულ კითხვებს ბადებს: თუ ვენტილაციის სისტემა ნამდვილად ეფექტური იყო, როგორ შეეძლო კვამლს ხანძრის წყაროდან ასე შორს მყოფი პირებისთვის ზიანის მიყენება. ეს იმაზე მიუთითებს, რომ ექსპერტების შეფასებებიც კი შეიძლება უგულებელყოფდნენ კვამლის მოძრაობას, გვირაბის გეომეტრიასა და ვენტილაციის სტრატეგიას შორის ნიუანსირებულ ურთიერთქმედებას - რაც ხაზს უსვამს რეალისტურთან მიახლოებული მოდელირების, ვალიდაციისა და გადაწყვეტილების მიღების საჭიროებას. ცხრილში 2 წარმოდგენილია დამაზიანებელი ფაქტორების: ტემპერატურის, ნახშირჟანგის კონცენტრაციისა და ხილვადობის ცვალებადობა გვირაბის სიგრძეზე, როცა მის ცენტრალურ ნაწილში, გვირაბის ღერძულა ხაზთან განვითარებულია 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძარი.

ცხრილი 2. დამაზიანებელი ფაქტორების ცვალებადობა გვირაბის სიგრძის მიხედვით 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძრისათვის

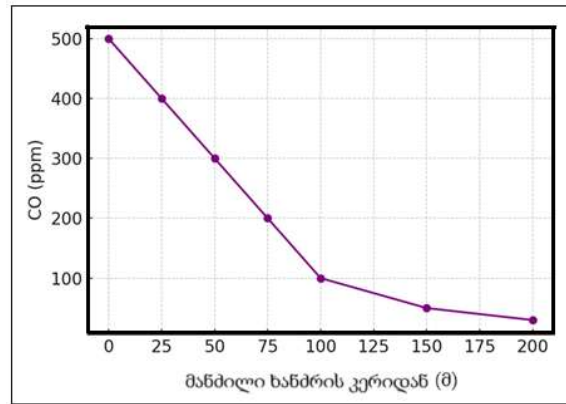
დაშორება ხანძრიდან, მ	ტემპერატურა, °C	CO კონცენტრაცია, ppm	ხილვადობა, მ
0	600	500	5
25	400	400	6
50	300	300	8
75	200	200	12
100	150	100	20
150	100	50	30
200	80	30	40

პირველი და მეორე ცხრილების შედარებიდან ჩანს, რომ ხანძრის კერიდან 200 მ მანძილზე ჰაერის ტემპერატურა აღემატება ადამიანის სასიცოცხლო ზღვარს; 25 მ მანძილიდან CO-ს კონცენტრაცია ადამიანის სასიცოცხლო ფარგლებშია, ხოლო ხილვადობა კრიტიკულია ხანძრის კერიდან 50-60 მ მანძილზე.

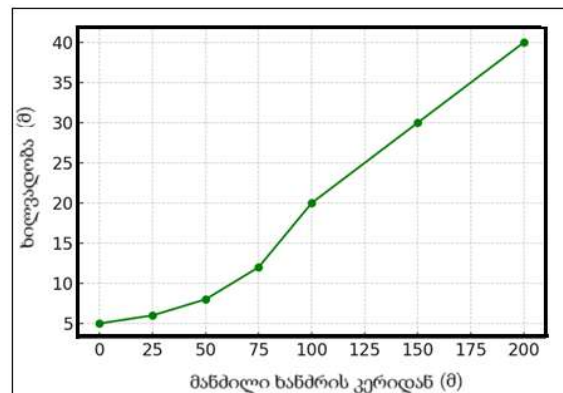


ფიგ. 2. ჰაერის ტემპერატურის ცვალებადობა გვირაბის სიგრძის მიხედვით 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძრის დროს

დამაზიანებელი ფაქტორების ცვალებადობის გრაფიკები (ფიგ. 1-3) შედგენილია CFD მოდელირების შედეგების იდეალიზებული იმიტაციის საფუძველზე 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძრისათვის და აჩვენებს, თუ როგორ ვრცელდება დამაზიანებელი ფაქტორები საწყისი ინერციული წმინდა ნაკადის პირობებში, უკუდინების განვითარებამდე.



ფიგ. 3. ნახშირბადის მონოოქსიდის ცვალებადობა გვირაბის სიგრძის მიხედვით 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძრის დროს

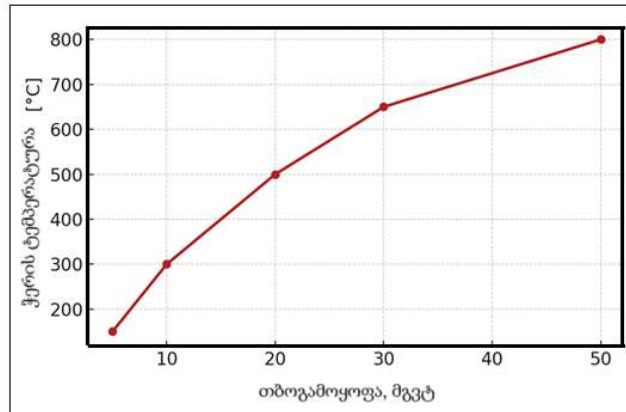


ფიგ. 4. ბილვადობის ცვალებადობა გვირაბის სიგრძის მიხედვით 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძრის დროს

სხვადასხვა სიმძლავრის ხანძრის პირობებში გვირაბის ჭერში ტემპერატურის ცვალებადობა და ბეტონის სამაგრის მინიმალური სისქე, რომელიც გაუმკლავდება აღნიშნულ ტემპერატურას დროის გარკვეული პერიოდით შეტანილია ცხრილში 3. ცხრილი შედგენილია რიცხვითი მოდელირების შედეგების მიხედვით. ტემპერატურის ცვალებადობა გვირაბის ჭერში წარმოდგენილია ფიგ. 5-ზე.

ცხრილი 3. ტემპერატურის ცვალებადობა გვირაბის ჭერში და კედლის ცეცხლმედეგობა

თბოგამოყოფა, მგვტ	ჭერის ტემპერატურა, °C	ბეტონის სისქე, მმ	ცეცხლმედეგობა, წთ
5	150	25	30
10	300	35	60
20	500	50	90
30	600	60	120
50	800	70	120



ფიგ. 5. ტემპერატურის ცვალებადობა გვირაბის ჭერში ხანძრის სიმძლავრის მიხედვით

6. ფრუდის რიცხვი (Fr)

ფრუდის რიცხვი გამოიყენება ინჟინერიასა და ფიზიკაში ინერციული და გრავიტაციული ძალების შესაფასებლად და ერთმანეთთან შესადარებლად. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი ხდება ფრუდის რიცხვი ხანძრების მოდელირების დროს და გვირაბებში ვენტილაციის ეფექტიანობის დასადგენად. ფრუდის რიცხვი გვიჩვენებს, აქვს თუ არა ვენტილაციის ნაკადს საკმარისი ძალა, რომ დაძლიოს ცხელი აირების აღმავალი მოძრაობა.

ფრუდის რიცხვი ზოგადად ფორმულირებულია სავენტილაციო ნაკადის სიმკვრივის ან ტემპერატურის მიხედვით

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gH\Delta\rho/\rho_0}} \quad \text{ან} \quad Fr = \frac{u}{\sqrt{gH\Delta T/T_0}} \quad (3)$$

სადაც u არის სავენტილაციო ნაკადის სიჩქარე, მ/წმ; g - დედამიწის მიზიდულობის აჩქარება, 9.81მ/წმ^2 ; H - გვირაბის სიმაღლე, 5.0 მ; $\Delta\rho$ - გარემოსა და ცხელი აირების სიმკვრივეთა სხვაობა, კგ/მ³; ρ_0 - გარემოს (გარე) ჰაერის სიმკვრივე, 1.2 კგ/მ³; ΔT - გარემოსა და ცხელი აირების ტემპერატურათა სხვაობა, K; T - გარემოს (გარე) ჰაერის ტემპერატურა, K.

აღნიშნული ფორმულები გამოიყენება ვენტილაციის სიძლიერის შესაფასებლად ცხელი აირების საპირისპირო მოძრაობის შემთხვევაში დადმავალი სავენტილაციო ნაკადების პირობებში. თუ $Fr > 1$, ვენტილაცია ძლიერია და ჰაერის ნაკადის უკუდინება ცხელი გაზების აღმავალი მოძრაობის გამო არ აღიმკვრება. როცა $Fr < 1$, მაშინ ვენტილაცია სუსტია ხანძრის მიერ აღძრულ წვევასთან შედარებით და ადგილი აქვს კვამლისა და წვის აირების უკუდინებას. შესაძლებელია ფორმულებს (3) მივცეთ ხელით ანგარიშისათვის უფრო მოსახერხებელი სახე

$$Fr = \frac{u\sqrt{\rho_0}}{\sqrt{gH\Delta\rho}} \quad \text{ან} \quad Fr = \frac{u\sqrt{T_0}}{\sqrt{gH\Delta T}} \quad (4)$$

ფრუდის რიცხვის მოცემული ფორმულები გამოიყენება თითქმის ყველა სახის CFD მოდელირებაში, ხანძრის ანალიზისა და კრიტიკული სიჩქარის განსასაზღვრად. ფრუდის რიცხვის გამოყენება გვირაბებში ხანძრის შემთხვევაში შესაძლებელია მაშინ, როცა: 1. ფრუდის რიცხვი არის მუდმივი სიდიდე, ე.წ. კრიტიკული მნიშვნელობა $Fr_c = 4.5$; 2. ხანძრის კერაზე სუფთა და ნაძწვი აირების თანაფარდობა არის 50% - 50%; 3. გვირაბის სიგანისა და სიმაღლის თანაფარდობა არის 1.6. ჩვენ მივუთითეთ, რომ ეს პირობები რეალურ პირობებში

პრაქტიკულად მიუღწეველია. კერძოდ: 1. ფრუდის რიცხვი იცვლება ტემპერატურისა და ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობის შესაბამისად და არ არის მუდმივი სიდიდე; 2. ხანძარი არ არის სტაციონარული ან ერთგვაროვნად განაწილებული; ის უმეტესად თანდათანობით ვითარდება, ქმნის სითბოს, კვამლისა და წვის ტოქსიკური პროდუქტების ცვალებად ზონებს და ხშირ შემთხვევაში არ არის დაცული მითითებული თანაფარდობა 50% - 50%; 3. ბევრი თანამედროვე მრავალზოლიანი გვირაბი ხასიათდება დიდი სიგანით და რთული გეომეტრიით დაბალი ჭერის პირობებში და უმეტესად არ არის დაცული მითითებული თანაფარდობა 1.6. გარდა ამისა, გვირაბის დახრილობას შემოაქვს გრავიტაციულ ეფექტები, რომლებიც მნიშვნელოვნად ცვლის ამომგდები ნაკადის დინამიკას, რასაც სტანდარტული ფრუდის რიცხვი ვერ ღებულობს მხედველობაში. როგორც კი თბოგამოყოფა 30 მეგავატს გადააჭარბებს, თერმული ნაკადი ხშირად დომინირებს მექანიკურ ვენტილაციაზე, ცვლის ნაკადის მიმართულებას მიუხედავად იმისა, აქვს თუ არა ნაკადს კრიტიკული სიჩქარე.

ზოგჯერ გამოიყენება ფრუდის რიცხვის ინვერსიული სახით ჩაწერილი ფორმულა

$$Fr' = \frac{\Delta \rho g H}{\rho_0 u_c^2} \quad (5)$$

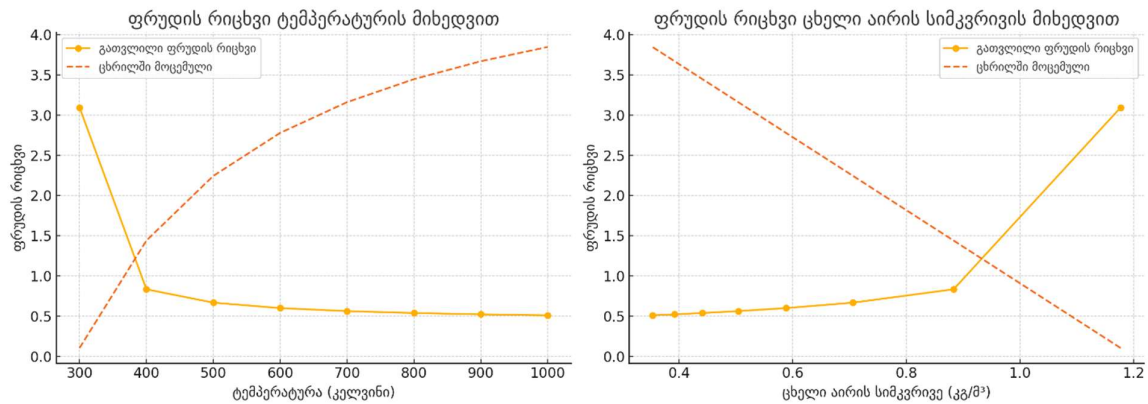
(3) ან (4) და (5) ფორმულებით განსაზღვრულ სიდიდეებს შორის დაცულია ფარდობა

$$Fr' = 1/Fr^2 \quad \text{ან} \quad Fr = 1/\sqrt{Fr'} \quad (6)$$

ფრუდის რიცხვის სტანდარტული და ინვერსიული რიცხვითი სიდიდეები შეტანილია ცხრილში 4 და მათი შედარებისა და ანალიზის მიზნით აგებულია გრაფიკები, რომლებიც მოცემულია ფიგ. 6-ზე.

ცხრილი 4. ფრუდის რიცხვის სტანდარტული და ინვერსიული სიდიდეები, $\rho_0 = 1.2 \text{ კგ/მ}^3$

ტემპერატურა (K)	აირის სიმკვრივე ρ (კგ/მ ³)	$\Delta \rho$ (კგ/მ ³)	სტანდარტული Fr	ინვერსიული Fr'
300	1.177	0.023	3.094	0.104
400	0.883	0.317	0.833	1.440
500	0.706	0.494	0.668	2.244
600	0.588	0.612	0.600	2.779
700	0.504	0.696	0.562	3.161
800	0.441	0.759	0.539	3.447
900	0.392	0.808	0.522	3.670
1000	0.353	0.847	0.510	3.847



ფიგ. 6 . ფრუდის რიცხვის ცვალებადობა წვის პროდუქტების ტემპერატურისა და სიმკვრივის მიხედვით

ცხრილი 4 და ფიგ. 5-ის მონაცემებით ცხადი ხდება, რომ ფრუდის რიცხვი ხანძრის პირობებში არ არის მუდმივი სიდიდე. ამგვარად, ტემპერატურისა და სიმკვრივის გრადიენტების განვითარებასთან ერთად ხანძრის სცენარებში იცვლება ფრუდის რიცხვიც. აღნიშნული არასტაციონარულობა (დროზე დამოკიდებულება) ართულებს მის გამოყენებას ძირითად კრიტერიუმად საგანგებო ვენტილაციის პროექტებში.

აქედან გამომდინარე, წინსწრებით აღვნიშნოთ, რომ საჭიროა მრავალფაქტორიანი დინამიკური მოდელი. აღნიშნულმა მოდელმა უნდა გაითვალისწინოს: 1. თბოგამოყოფისა და ხანძრის გავრცელების დროში ცვალებადი ბუნება; 2. დაღმავალი მექანიკური ვენტილაციის მუშაობის გაუარესება ხანძრის განვითარების კვალობაზე; 3. გვირაბის გეომეტრია და დახრილობა; 4. თერმული და მექანიკური ნაკადების ალგებრულად შეკრებადობა; 5. გაფართოებული CFD მოდელირებების შედეგები, რომლებიც მოიცავს მითითებულ დინამიკას შედეგების ექსპერიმენტულ ვალიდაციასთან ერთად. აღნიშნული კომპონენტების მხედველობაში მიღებით შესაძლებელი გახდება საგზაო გვირაბის უფრო უსაფრთხო დაპროექტება. მითითებული მოდელირება ასევე უნდა იყოს სინქრონიზებული ევაკუაციის მოდელირებასთან, რათა უზრუნველყოფილი იყოს სიცოცხლის გადარჩენა ზემოთ მითითებული უსაფრთხოების კრიტიკული ზღურბლების დადგომის დროის შუალედის ფარგლებში.

7. ვენტილაციის სისტემის წვლილი

ვენტილაციის სისტემები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ გვირაბში ჰაერის ნაკადის კონტროლში, არა მხოლოდ სუფთა ჰაერის მიწოდებისთვის, არამედ განსაკუთრებით ისეთ კრიზისულ სიტუაციებში, როგორიცაა ხანძარი, ნაკადის მიმართულების კონტროლისა და სიჩქარის უზრუნველყოფისათვის. ვენტილაციის მიერ სისტემაზე მინიჭებული მთლიანი წნევა (P) შეიძლება დაიყოს და იყოფა კიდევაც ორ ძირითად კომპონენტად: სტატიკური წნევა (P_s) და დინამიკური წნევა (P_d). ვენტილატორის სტატიკური წნევა იხარჯება სხვადასხვაგვარი აეროდინამიკური წინაღობის გადალახვაზე, ხოლო დინამიკური წნევა სავენტილაციო ჰაერს ანიჭებს სიჩქარეს.

დინამიკური წნევა განისაზღვრება ფორმულით

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (7)$$

ამ ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე ზემოთ განიმარტა. ცხადია, რომ ფორმულების (2) და (7)-ის მიხედვით შეგვიძლია დავწეროთ, რომ $\Delta P = P_d$.

ამგვარად, ვენტილატორის საერთო (მთლიანი) წნევა არის სტატიკურ და დინამიკურ წნევათა ჯამი. საერთო წნევა შესაძლებელია განვიხილოთ როგორც საერთო ენერგია, რომელიც ვენტილატორმა უნდა უზრუნველყოს ელექტრული ქსელიდან წაღებული ენერგიის ხარჯზე. აღნიშნულიდან გამომდინარე, შესაძლებელია წარმოვადგინოთ საერთო წნევის საანგარიშო ფორმულა

$$P = P_s + P_d \quad (8)$$

გვირავის სისტემებში ვენტილატორები არა მხოლოდ „ჰაერის მოცულობების გადაადგილების“ ფუნქციას ასრულებენ, არამედ მათი მთავარი წვლილია კონტროლირებადი მიმართულების ნაკადის შექმნა, რომელსაც შეუძლია ხანძრის შედეგად გამოწვეული ამომგდები მოძრაობის წინააღმდეგ ბრძოლა (კვამლის გავრცელების თავიდან ასაცილებლად ევაკუაციის მარშრუტის მიმართულებით) ან, პირიქით, ევაკუაციის მხარდაჭერა, კვამლის მიმართვით სპეციალური ღიობებისაკენ. აღნიშნული კონტროლირებადი ნაკადი საჭიროა უსაფრთხოების სტრატეგიებისა და ევაკუაციის მარშრუტების დაგეგმვისთვის.

მნიშვნელოვანია გავითვალისწინოთ, რომ ხანძარი მაქსიმალურ სიმძლავრეს მაშინვე არ აწვითარებს, მაგალითად, საბოლოოდ 30 მეგავატს მიღწეული ხანძარი თანდათან გაიზრდება ამ მნიშვნელობამდე თბოგამოყოფის ზრდის მრუდის მიხედვით, რაც დამოკიდებულია გამოყენებული საწვავის სახეობაზე, გვირავის გეომეტრიასა და გარემო პირობებზე. ამრიგად, ხანძრის ადრეულ ეტაპებზე ვენტილაციას შეუძლია ეფექტურად იმუშაოს ნაკადთან, რადგან ხანძრის დინამიკური წნევა კვლავ დაბალია და მექანიკური წნევა დომინირებს. მხოლოდ გარკვეული ზღვრის მიღწევის შემდეგ იცვლება თანაფარდობა და ვენტილაცია კონკურენციას უწევს სულ უფრო ძლიერ ზეწოლას და გაფართოებული აირების ამომგდებ ნაკადებს. ამიტომ მნიშვნელოვანია არა მხოლოდ სტატიკური საბოლოო მდგომარეობის ანალიზი, არამედ ვენტილაციის ეფექტების დროითი მსვლელობა დინამიკურად განვითარებადი ხანძრის პირობებში.

ვენტილატორის ეფექტურობას კიდევ რამდენიმე ფაქტორი ზღუდავს. მექანიკურად, ვენტილატორები შექმნილია მაქსიმალური მუშაობისთვის, რომლის დროსაც მათ შეუძლიათ გარკვეული რაოდენობის ჰაერის ნაკადის მიწოდება და წნევის ვარდნის დაძლევა. ამ ზღვრის მიღწევის შემდეგ, შეუძლებელია ნაკადის სიჩქარის შემდგომი გაზრდა სისტემის გადატვირთვის გარეშე. მეორე მთავარი შეზღუდვა არის თერმული წინააღმდეგობა, ვენტილატორები ხანძრის დროს ექსტრემალურ ტემპერატურაზე არიან დამოკიდებული და ტემპერატურის მატებასთან ერთად, მათი მასალები დეგრადირდება და საკისრები, ელექტრონიკა და სხვა კრიტიკული კომპონენტები მწყობრიდან გამოდის. თუ ვენტილაციის ზონაში ტემპერატურა აღემატება საპროექტო ლიმიტებს (როგორც წესი, დაახლოებით 250-400°C ტიპის მიხედვით), მათი ფუნქციონირების ვადა მკვეთრად მცირდება, რაც იმას ნიშნავს, რომ ვენტილაცია ეფექტურია მხოლოდ შეზღუდული დროის განმავლობაში.

კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი ასპექტია ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობა გვირაბის გასწვრივ: ხანძართან უფრო ახლოს, ჰაერი მნიშვნელოვნად თბილი და მსუბუქია, ვიდრე გარემოდან შეწოვილი ჰაერი. ამიტომ, ვენტილატორები მუშაობენ სხვადასხვა სიმკვრივის და შესაბამისად, განსხვავებული დინამიკური წინააღმდეგობის მქონე გარემოში, რაც გავლენას ახდენს მათ ფაქტობრივ წვლილზე წნევის საერთო ბალანსში. გარდა ამისა, აღსანიშნავია, რომ გვირაბის ვენტილაცია, როგორც წესი, არ ხორციელდება ერთი მოწყობილობით - ეს არის ვენტილატორების ერთობლიობა, რომლებიც განლაგებულია თანმიმდევრულად ან განივი სეგმენტებით და ერთად მუშაობენ ნაკადზე ზეგავლენის განსახორციელებლად. თითოეულ ამ ვენტილატორს აქვს განსხვავებული მყისიერი წვლილი, რაც დამოკიდებულია მის პოზიციაზე, გარემოს ტემპერატურაზე, გვირაბის კონფიგურაციასა და ნაკადის მიმართულებაზე.

ვენტილაციის ეფექტურობის განსაკუთრებული გაძლიერება ასევე დაკავშირებულია გვირაბის განივი კვეთის ფართობთან. ეს პრინციპი ზოგადად მოქმედებს. ვენტილატორები კონსტრუქციით მიმართულები არიან - მათი ეფექტი კონცენტრირებულია გვირაბის ღერძის მიმართულებით, ხოლო ხანძრის შედეგად წარმოქმნილი ამწევი ძალებს არ ახასიათებთ გავრცელების უპირატესი მიმართულება და მათ უნდა გადალახონ გვირაბის მთელი განივი კვეთის წინააღმდეგობა. მარტივად რომ ვთქვათ, მიუხედავად იმისა, რომ ვენტილატორი ნაკადის ენერგიას მიზანმიმართულად და მიმართულებით „აგზავნის“ კონკრეტული მიმართულებით, ამწევი ძალა ნაწილდება მთელ განივი ზედაპირზე და ხახუნის, გრიგალისა და დისიპაციის გამო უფრო მეტ დანაკარგებს აქვს ადგილი. ეს ეფექტი ვრცელდება არა მხოლოდ გვირაბებზე, არამედ ზოგადად ნაკადის სისტემებზე, სადაც მექანიკურად ამოძრავებული ნაკადი უფრო მაღალ ეფექტურობას ავლენს, ვიდრე დიფუზიური ან ამომგდები ნაკადი, რადგან ნაკადის მექანიკურ კომპონენტს შეუძლია უკეთ გადალახოს ადგილობრივი დანაკარგები და მოახდინოს ენერგიის ეფექტური მიმართულებით კონცენტრირება. ამრიგად, ვენტილაციის სისტემების პროექტმა უნდა გაითვალისწინოს არა მხოლოდ ვენტილატორის სიმძლავრე, არამედ გვირაბის გეომეტრიაც, რადგან განივი კვეთის პროფილი პირდაპირ გავლენას ახდენს იმაზე, თუ როგორ გადაეცემა მიწოდებული ენერგია კონტროლირებად ნაკადის ველს და რამდენად ეფექტურად შეუძლია მას ხანძრით გამოწვეული ძალებთან წინააღმდეგობა.

შეჯამებისთვის, ვენტილაცია ხელს უწყობს ნაკადის საერთო კონტროლს მიმართულებისა და წნევის ეფექტების მეშვეობით, რაც შეიძლება სინერგიული იყოს ხანძრის მიერ წარმოქმნილ ნაკადთან ან, პირიქით, იმოქმედოს როგორც ხანძარსაწინააღმდეგო ბარიერმა. ეფექტური სისტემის შესაქმნელად აუცილებელია არა მხოლოდ მაქსიმალური მნიშვნელობების, არამედ დროითი დინამიკის ზუსტი ანალიზი. ამ შემთხვევაში ჩვენ მიგვაჩნია, რომ მართებულია ჩვენს მიერ შემოტანილი დებულება იმის შესახებ, რომ თერმული და მექანიკური ნაკადები ალგებრულად იკრიბებიან გვირაბების სავენტილაციო სისტემებში.

8. სახანძრო უსაფრთხოების ინტეგრირებული მოდელირება

8.1. პრობლემის არსი

საავტომობილო გვირაბებში ხანძრის მოდელირებისას გამოიყენება CFD მეთოდები, რათა მაღალი სიზუსტით მივიღოთ [34-44]:

- ტემპერატურული ველის ცვალებადობა;
- კვამლის გავრცელება;
- ნახშირჟანგისა და სხვა ტოქსიკური გაზების კონცენტრაციის ცვალებადობა;
- ხილვადობის ცვალებადობა;
- ჰაერის სიჩქარე და მიმართულება.

CFD მოდელირება საჭიროებს მცირე დროით ბიჯს (მაგალითად, 0.1 – 1.0 წამი), რათა აღწეროს სწრაფად ცვლადი პროცესები, განსაკუთრებით ხანძრის განვითარების პირველ წუთებში მხედველობაში აგრეთვე მისაღები ხანძრის გავრცელების არაერთგვაროვანი და დინამიკური ბუნება. სტატიკური, ერთწერტილიანი ხანძრის წყაროს ნაცვლად, ფაქტობრივი ხანძრები ხშირად მოიცავს მრავალჯერადი აალების წერტილებს, რომლებიც გამოწვეულია სითბური გამოსხივებით ან ალის ახლომდებარე სატრანსპორტო საშუალებებზე ან ინფრასტრუქტურაზე გავრცელებით. დაგვიანებული მეორადი აალება, რაც იწვევს ახალი ხანძრის კერების წარმოქმნას სხვადასხვა ადგილას და სხვადასხვა დროს.

ევაკუაციის მოდელები (მაგალითად, Pathfinder, MassMotion, BuildingEXODUS, AnyLogic) ძირითადად იყენებენ უფრო დიდ დროით ბიჯს (5–10 წამი ან მეტი), რადგან ადამიანთა გადაადგილება შედარებით უფრო ნელა მიმდინარეობს, ვიდრე ხანძრის დინამიკა და ტემპერატურული ცვლილებები.

ამგვარად, ხანძრის სცენარებს ესაჭიროება მაღალი სიხშირის დროითი მონაცემები (წამებზე დაკვირვება), ხოლო ევაკუაციას - დაბალი სიხშირის მოდელები (წუთებზე დაკვირვება).

8.2. სამეცნიერო გამოწვევები ინტეგრაციისას

დროით დიაპაზონებს შორის ეს წინააღმდეგობა შესაძლებელია ისე გადაწყდეს, რომ ორივე მოდელის ინტეგრაცია რეალისტური და ინტერპრეტირებადი იყოს. ინტეგრაციისათვის პრინციპში გამოსაყენებელია შემდეგი მიდგომები:

1. ასინქრონული დროითი მასშტაბები – CFD-ში თითოეული წამზე მიმდინარეობს მნიშვნელოვანი პროცესები, ხოლო ევაკუაციისას ადამიანები მოძრაობენ უფრო ხანგრძლივ ინტერვალებზე.

2. ინფორმაციის აგრეგაცია – როგორ უნდა წარმოვადგინოთ სწრაფად ცვალებადი ტემპერატურული ველები ისე, რომ იყოს “საშუალო”, “მაქსიმალური” ან “მინიმალური” ერთეულ დროში ადამიანთა ევაკუაციის მოდელებისთვის.

3. შერწყმის მეთოდოლოგია ორი მეთოდით:

- ცალმხრივი ინფორმირება, (CFD-ის შედეგები მიეწოდება ევაკუაციის მოდელს, მაგრამ უკუმოქმედება არ ხდება);

- ორმხრივი ინფორმირება, ევაკუაციის მოდელირების შედეგები ზემოქმედებს CFD-ზე (მაგალითად, გახსნილი კარების გავლენა, ადამიანთა მოძრაობით გამოწვეული დინებების ცვლადობის გავლენა და სხვ.).

4. კრიტიკული პარამეტრების მონაცემთა გადაცემა CFD-დან ევაკუაციის მოდელისთვის სათანადო მოქმედებების განსაზოცრელებლად:

- ხილვადობა, გავლენას ახდენს გადაადგილების სიჩქარეზე;
- ტემპერატურა, ზემოქმედებას ახდენს ადამიანის შესაძლებლობაზე გადაადგილდეს (მაგალითად, $\geq 60^{\circ}\text{C}$, გადაადგილება შეუძლებელია);
- ტოქსიკური გაზების კონცენტრაცია, მოწამვლის რისკი, დაყოვნებები/გაჩერება.

8.3. ინტეგრაციის პრაქტიკული მაგალითები

მაგალითი 1 – FDS + Pathfinder ინტეგრაცია: ხანძრის სცენარის განვითარება ხდება CFD მოდელით, FDS (Fire Dynamics Simulator). ამ შემთხვევაში ევაკუაციის მოდელი არის Pathfinder.

FDS-ის სერიების მიხედვით ხილვადობისა და CO-ის დროითი მონაცემების გადატანა ხდება Pathfinder-ით განსაზოცრულ მარშრუტზე, ევაკუაციაზე ზემოქმედებს ხილვადობა და ტოქსიკურობა.

დროითი ინტერვალები: FDS იძლევა შედეგებს 0.5 წმ ბიჯით. ევაკუაციის მოდელი Pathfinder იღებს შედეგებს 1-5 წმ ინტერპოლირებული მონაცემების სახით.

ინტეგრაციის შედეგები: FDS-ით მიღებული საშუალო მნიშვნელობების მიწოდება ყოველ 5 წმ ინტერვალში Pathfinder-ისთვის.

მაგალითი 2 – CFD და ევაკუაციის მოდელის კომბინაცია გვირაბში მიმდინარე ხანძრის სცენარზე შემდეგი პირობებით: 1000 მ სიგრძის გვირაბი, 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძრის წყარო განლაგებულია ცენტრში, საგანგებო ვენტილაციის სისტემის ჩართვა ხდება მე-60 წამზე

ხანძრის მოდელირება CFD მეთოდით. ტემპერატურის ველის 3D მოდელირება, 0.2 წმ ბიჯით, დროის ინტერვალი 0–300 წმ. ევაკუაციის სიჩქარის მოდელირება გამავალი პუნქტების მდებარეობით ხდება 1 წმ ბიჯით. ამგვარად, დროის ბიჯი ევაკუაციის მოდელირებისათვის 5-ჯერ მეტია.

ორივე მოდელირების შერწყმა: ყოველ მარშრუტზე Pathfinder იღებს წუთზე გადაყვანილი ტემპერატურისა და ხილვადობის მაქსიმუმებს. ზღვრული პირობები: თუ ტემპერატურა $\geq 80^{\circ}\text{C}$ ან ხილვადობა ≤ 5 მ, ადამიანების გადაადგილება უნდა შეწყდეს.

მიღებული შედეგი: უსაფრთხო ევაკუაციის დრო შედარდება ხელმისაწვდომ ევაკუაციის დროს. ხანძრის განვითარების მოდელირების (CFD მეთოდი) და ევაკუაციის მოდელირების შედეგების ინტეგრაციისა და პრაქტიკული გამოყენებისათვის შესაძლებელი რეკომენდაციები შეტანილია ცხრილში 5.

ცხრილი 5. ხანძრის განვითარებისა და ევაკუაციის მოდელირებათა ინტეგრაცია

გამოწვევა	რეკომენდაცია
სხვადასხვა დროითი მასშტაბები	CFD-დან ევაკუაციის მოდელისათვის გამოიყენე მონაცემთა საშუალო მნიშვნელობები
მონაცემთა გადაცემა	გამოიყენე CSV ან Smokeview-ის SLCF ფენები გამოსატანად
ხილვადობა, ტემპერატურა CFD მოდელირების მიხედვით	გავლენის გადაცემა ევაკუაციის მოდელირების შედეგებზე
ინტეგრირებული ანალიზის სტრატეგია	გამოიყენე ზემოთ აღწერილი ცალმხრივი ინფორმირება, შემდგომ ორმხრივი ინფორმირება თუ საჭიროა

9. დასკვნები

- ტექნიკური მოწყობილობები საკმარისი არ არის უსაფრთხოებისთვის — აუცილებელია ინჟინრული, ორგანიზაციული და ადამიანური ფაქტორების სინთეზი.
- ინტეგრირებული მოდელები საჭიროებს განვითარებას: ხანძრის CFD მოდელები და ევაკუაციის მოდელები უნდა მუშაობდნენ ერთიან სისტემაში, ხანძრის რეალური სცენარების უფრო ზუსტად ასახვისთვის.
- ფრუდის რიცხვის გამოყენება ეფექტიანია, მაგრამ საჭიროებს დაზუსტებას, რათა მოერგოს ცვალებად გარემო პირობებს.
- დროითი და სივრცითი ინტეგრაციის სირთულეები გადალახვადია ადეკვატური მათემატიკური და საინჟინრო მიდგომების საშუალებით.
- უსაფრთხოების სისტემები უნდა იყოს დინამიკური, ადაპტირებული და მრავალფუნქციური, რათა ეფექტიანად უპასუხოს ხანძრის სხვადასხვა სცენარს.

ეს ნაშრომი დაფინანსდა შოთა რუსთველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მიერ [გრანტის ნომერი FR-22-12 949]. სათაური: კრიტიკული სიჩქარისა და ხანძრით გამოწვეული უკუდინების შესწავლა საგზაო გვირაბებში სიცოცხლის გადასარჩენად.

1. Bird A., Carvel R. Handbook of Tunnel Fire Safety. *Second edition. Thomas Telford Limited*, 2012, p. 694.
2. FIT - Thematic Network FIT 'Fire in Tunnels' is supported by the European Community under the fifth Framework Program 'Competitive and Sustainable Growth' Contract n° G1RT-CT-2006, p. 76.
3. UN, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe, *Report TRANS/AC.7/9*, 2001. p.60.
4. UN, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe, *Report TRANS/AC.7/9Add 1*, 2002. p.2.
5. UN, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe, *Report TRANS/AC.7/13*, 2003. p.8.
6. UN, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe, *Report TRANS/AC.7/15*, 2004. p.7.
7. UN, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe, *Report TRANS/AC.7/11*, 2002. p. 6.
8. The White Book 2001, Published in April 24, 2001, Sweet & Maxwell Ltd, ISBN 10: 0421745800, ISBN 13:9780421745803.
9. Haack. A. Fire Protection in Traffic Tunnels: General Aspects and Results of the EUREKA Project, TUNNELING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, 1998, Volume 13, № 2. pp. 377-381.
10. Li Y.Z., Vylund L., Ingason H., Appel G. Influence of fire suppression on combustion products in tunnel fires. *The work Co-financed by the European Union*. Report 2015, p.70.
11. Lanchava O.A. Heat and mass exchange in permanent mine workings. *Journal of Mining Science*, 1982, 1 (6), 87-92.
12. Lanchava O., Ilias N., Andras I., Moraru R., Neag I. On the Ventilation of Transport Tunnels in the Présence of a Strong (Heavy) Fire. *Annales of the University of Petrosani*, Petrosani (Romania), 2007, Vol. 9 (XXXVI), Part 1, pp. 219-227.
13. Lanchava O., Ilias N. Critical velocity analysis for safety management in case of tunnel fire. *MATEC Web of Conferences* 305, 00023, 2020.
14. Lanchava O., Ilias N. Some issues of thermal calculation of ventilation air for the metro. *Journal of Engineering Sciences and Innovation*, 2017, 2 (2), 92-105.
15. Lanchava O., Nozadze G., Bochorishvili N., Lebanidze Z., Arudashvili N., Jangidze M., Tsikarishvili K. Criteria for evaluation of emergency firefighting in transport tunnels. *Transport Bridge Europe-Asia, Proceedings of conference*, Tbilisi, 2014, 29-35.
16. Ланчавა О.А. , Лебанидзе З.Б. По поводу коллапса системы вентиляции тоннеля при сильном пожаре. *Журнал «Транспорт»*, №3-4 (31-32), Тбилиси , 2008. с. 29-31.
17. Lanchava O., Medzmariashvili E., Ilias N., Khitalishvili G., Lebanidze Z. Prospects of usage of transformable systems for extinguishing fire in tunnels. *International Scientific Conference "Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas"*, Tbilisi, 2009. pp. 301-308.

18. Lanchava O.A. Hygroscopic heat and mass transfer in underground structures. GTU, 1998, Tbilisi.
19. Lanchava O.A. Heat and mass exchange in newly driven mine workings. *Journal of Mining Science*, 1985, **1** (5), 99-104.
20. Lanchava O., Ilias N., Nozadze G., Tsanava D. Study of Propagation of Harmful Factors of Fire in Short Road Tunnels with Different Inclinations. *MATEC Web of Conferences* 342, 03023, 2021.
21. Lanchava O., Ilias N. Complex calculation method of temperature, mass transfer potential and relative humidity for ventilation flow in subway. *Journal of Engineering Sciences and Innovation*, 2018, **3** (1), 69-84.
22. Vaitkevicius A., Carvel R. Investigating the Throttling Effect in Tunnel Fires. *Fire Technology*, Vol. 52, 2016, pp. 1619–1628.
23. Li Y.Z., Ingason H. Discussions on critical velocity and critical Froude number for smoke control in tunnels with longitudinal ventilation. *Fire Safety Journal*, Vol. 99, 2018, pp. 22-26.
24. Lanchava O., Ilias N., Radu S.M., Jangidze M., Khokerashvili Z. Fire development study on physical models of transport tunnels. *MATEC Web of Conferences* 342, 03020, 2021.
25. Lanchava O., Abashidze G., Tsverava D. Securing fire safety for underground structures. *Quality-Access to Success*, 2017, **18**.
26. Lanchava O., Ilias N., Nozadze G., Radu S., Andras I., Moraru R. Developing of Wi-Fi monitoring control systems for damage factors of fire in road tunnels. *The XIth Edition of the Annual Conference "The Academic Days of Technical Sciences Academy of Romania"*, 2016.
27. Lanchava O., Ilias N., Nozadze G. Some problems for assessment of fire in road tunnels. *Supplement of Quality-Access to Success*. Bucharest, Vol. 18, (S1), 2017, pp. 69-72.
28. Ilias N., Lanchava O., Nozadze G. Numerical modelling of fires in road tunnels with longitudinal ventilation system. *Supplement of Quality-Access to Success*. Bucharest, Vol. 18, (S1), 2017, pp. 85-88.
29. Li Y.Z., Lei B., Ingason H. *Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires*. *Fire Safety Journal*, Vol. 45, 2010, pp. 361-370.
30. Thomas P.H. The Movement of Smoke in Horizontal Passages against an Air Flow. *Fire Research Station*. Boreham Wood. 1968.
31. Lee C.K., Chaiken R.F., Singer J.M., Interaction between duct fires and ventilation flow: an experimental study. *COMBUSTION SCIENCE AND TECHNOLOGY*. Vol. 20, 1979, pp. 59-72.
32. Danziger N.H., Kennedy W.D. Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels. *Fourth International Symposium on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, BHRA Fluid Engineering*. 1982.
33. Kennedy W.D. Critical velocity: past, present and future. *Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels, JFL Lowndes*, 1996, pp. 305–322.
34. Lanchava O., Javakhishvili G. Impact of strong fires on a road tunnel ventilation system. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 15(4), 2021.
35. Lanchava O., Ilias N., Radu S., Nozadze G., Tsanava D. Analysis of the use of transformable elements in intelligent tunnel ventilation systems. *MATEC Web of Conferences* 354, 00020, 2022.

36. Lanchava O., Ilias N., Radu S., Nozadze G., Jangidze M. Preventing the Spread of Combustible Products in Tunnels by Implementing a Divisible System. *Environmental Engineering and Management Journal*. 21 (4), 2022, 627-635.
37. Lanchava O., Ilias N., Radu S., Javakhishvili G., Makharadze L. Influence of current direction in longitudinal ventilated road tunnels on the backflow of combustion products. *MATEC Web of Conferences* 373, 00076, 2022.
38. Lanchava O., Nozadze G., Tsanova D. FDS Modeling Results for 50-100 MW Fires in Terms of Semi-Transverse Ventilation in Road Tunnels. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 16(4), 2022.
39. Lanchava O., Javakhishvili G., Kunchulia T., Khokerashvili Z., Arudashvili N. Aspects of Critical Velocity Variation for Managing Fires and Air Pollution in Road Tunnels. *23rd International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2023*, 23(4.1).
40. Lanchava O., Ilias N., Radu S., Nozadze G., Javakhishvili G. Dynamics of damaging factors in inclined road tunnels according to the results of numerical modeling of up to 50 MW fires in terms of natural ventilation. *MATEC Web of Conferences*, 389, 00056, 2024.
41. Lanchava O., Bezhanishvili A., Javakhishvili G., Khokerashvili Z., Arudashvili N. Study of the throttling effect in tunnel fires. *Inżynieria Mineralna* 1(1), 2024.
42. Lanchava O., Ratiani N., Khokerashvili Z., Arudashvili N. Variation of Critical Velocity of Downward Ventilation in Inclined Road Tunnels. *24rd International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2024*.
43. Lanchava O., Bezhanishvili A., Abshilava A., Ratiani N. On Legislation and Some Aspects of Occupational Safety in GEORGIA. *24rd International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2024*.
44. Lanchava O. Clarification of fire characteristics in a road tunnel based on numerical and laboratory studies. *Edelweiss Applied Science and Technology*, Learning Gate, 8(6), 2024.

Integrated Analysis of Ventilation System Efficiency and Lifesaving in Tunnel Fire Conditions

Professor Omar Lanchava

Summary

This scientific article explores the critical relationship between ventilation system efficiency and human survival during fire incidents in road tunnels. Through the analysis of several historical tunnel fires, the research confirms that ventilation systems, although essential, are not sufficient on their own to guarantee life safety. These findings highlight the need for comprehensive models that integrate various influencing factors.

A new methodological approach is proposed, emphasizing the importance of the Dynamic Efficiency Factor (DEF) — an integrated parameter that evaluates the joint impact of fire dynamics, ventilation efficiency, and human evacuation risks. The DEF concept introduces a holistic framework that links technical performance with human behavioral models in emergency situations.

Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are employed to model the development of fires, temperature gradients, smoke propagation, and toxic gas dispersion. The analysis demonstrates that while the Froude number remains a crucial indicator for assessing ventilation performance, in real scenarios it fluctuates significantly. As such, reliance solely on the Froude number without adaptive corrections can lead to insufficient planning for fire emergencies.

One of the key challenges addressed in this study is the integration of CFD models with evacuation simulations. Differences in temporal and spatial resolution between the models complicate the integration process, yet overcoming these difficulties is essential for accurate risk assessment. The paper presents specific practical examples and outlines strategic recommendations for establishing effective, combined modeling methodologies.

Ultimately, the study concludes that achieving a reliable fire safety system requires more than just mechanical installations. It necessitates well-designed procedures, refined engineering approaches, robust management strategies, and close consideration of human factors. By applying such a multifactorial and dynamic framework, emergency planning for tunnel fires can become more resilient and effective, enhancing both structural safety and occupant survival prospects.

Key words: CFD models; evacuation models; integration of models; dynamic efficiency coefficient; Froude number.