

## საავტომობილო გვირაბში დამოძვლებული ხანძრის პარამეტრების ანალიზი

ომარ ლანჩავა<sup>1,2</sup>, ნიკოლაე ილიაში<sup>3</sup>, სორინ მიჰაი რადუ<sup>3</sup>, ლეონ მახარაძე<sup>1,2</sup>, თეიმურაზ კუნჭულია<sup>2</sup>, ნინო არუდაშვილი<sup>2</sup>, ზაზა ხოკერაშვილი<sup>2</sup>

<sup>1</sup>გ. წულუკიძის სამთო ინსტიტუტი, თბილისი, მინდელის 7

<sup>2</sup> საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, კოსტავას 77

<sup>3</sup> პეტროშანის უნივერსიტეტი, პეტროშანი, უნივერსიტეტის ქ. 20, რუმინეთი

### აბსტრაქტი

ამოცანის არსია სავენტილაციო ნაკადის აეროდინამიკისა და ვენტილაციის მნიშვნელოვანი პარამეტრების ექსპერიმენტული შესწავლა გვირაბში დამოძვლებული ხანძრის პირობებში. ექსპერიმენტების დროს გვირაბის აეროდინამიკა გართულებულია დამატებითი წინაღობების არსებობით, ხოლო დამახასიათებელი ცვალებადი სიდიდეები და პირობებია: გვირაბის დახრილობა, სითბოს გამოყოფის ტემპი, გვირაბის განივი კვეთი, გვირაბის სიგანის ფარდობა მის სიმაღლესთან, გვირაბის ტრანსპორტით შევსების კოეფიციენტი. ამოცანის გადაჭრის გზით გაუმჯობესდება ვენტილაციის ტექნოლოგიური მაჩვენებლები სიცოცხლის გადარჩენის თვალსაზრისით ხანძრის პირობებში. კვლევების მიზანია კრიტიკული სიჩქარის, უკუდინების სიგრძისა და გრადიენტ-ფაქტორის, ანუ გვირაბის დახრის კუთხის მიხედვით მითითებული სიჩქარისა და სიგრძის ცვალებადობის ტემპის მაჩვენებელი კოეფიციენტის დადგენა რიცხვითი და ფიზიკური მოდელების მეშვეობით. ფიზიკური მოდელების მასშტაბი არის 1:40 და 1:60. რიცხვითი მოდელები შესრულებულია სრული მასშტაბით პროგრამების „პიროსიმი“ და „ფლუენტის“ გამოყენებით. მიღებული შედეგების მიხედვით შესაძლებელია დავასკვნათ, რომ გვირაბის ფიზიკური მოდელი მოსახერხებელია ექსპერიმენტების ჩასატარებლად, რადგან ფრუდის კრიტერიუმის გამოყენება საშუალებას იძლევა ძლიერი ხანძრების სცენარები შესწავლილი იქნეს მცირე სიმძლავრის ხანძრით, რაც ექსპერიმენტებს აიაფებს უსაფრთხოების შემცირების გარეშე. ფიზიკური მოდელების გზით შესაძლებელია მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური მაჩვენებლების: ჰაერის ნაკადის კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების სიგრძის განსაზღვრა, მათი სიდიდეების კორელაცია გვირაბის დახრილობის, ტრანსპორტით გვირაბის შევსების კოეფიციენტის, ხანძრის სიმძლავრისა და სხვა მნიშვნელოვანი დამახასიათებელი პარამეტრების მიხედვით, რაც აგრეთვე გვაძლევს რიცხვითი ამოცანების ვალიდაციის შესაძლებლობას.

**საკვანძო სიტყვები:** საავტომობილო გვირაბის მოდელი; კრიტიკული სიჩქარე; უკუდინების სიგრძე; ფრუდის კრიტერიუმი; ტრანსფორმირებადი ელემენტი.

## 1. შესავალი

გვირაბებში მოდელირებული და რეალური ხანძრებისათვის დამახასიათებელი პარამეტრების: კრიტიკული სიჩქარის, უკუდინების სიგრძისა და გრადიენტ-ფაქტორის შესწავლა შესაძლებელია რიცხვითი და ფიზიკური მოდელებით და მათემატიკური ანალიზით. სუფთა ჰაერის დაღმავალი მოძრაობის შემთხვევაში განსაკუთრებით გამოკვეთილია კვამლისა და წვის სხვა პროდუქტების საპირისპირო მოძრაობა - უკუდინება. უკუდინების კრიტიკული სიჩქარე და უკუდინების სიგრძე არის ვენტილაციის მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური პარამეტრები, რომლებიც განსაზღვრავენ და განაპირობებენ ევაკუაციის მეთოდებსა და ხანძართან ბრძოლის საშუალებებს.

კრიტიკული სიჩქარე განიმარტება როგორც გრძივი ვენტილაციის მინიმალური სიჩქარე, რომელიც გამოიწვავს კვამლის უკუნაყადის წარმოქმნას. უკუდინების სიგრძე არის ის მანძილი, რომელზედაც დაღმავალ სუფთა ჰაერის ნაკადში ვრცელდება კვამლი და წვის ტოქსიკური პროდუქტები. გრადიენტ-ფაქტორი განიმარტება როგორც გვირაბის დახრილობის მიხედვით კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების სიგრძის ზრდის ტემპის მაჩვენებელი კოეფიციენტი. სავენტილაციო სისტემის კოლაფსი განიმარტება როგორც სავენტილაციო სისტემის მდგომარეობა, როცა გვირაბში ჰაერის მოძრაობის მიმართულებას და ინტენსიურობას განაპირობებს ხანძრის მიერ განვითარებული წევა მექანიკური ვენტილაციის წევის გავლენის კლებადობის პირობებში, მათი აღგებრულად შეკრების პირობიდან გამომდინარე.

როგორც აღნიშნა, საქართველოში უახლოეს 3-5 წელიწადში უნდა აშენდეს 50-ზე მეტი საავტომობილო გვირაბი, რომელთა საპროექტო გადაწყვეტების თანახმად, მოსალოდნელი საფრთხის ერთადერთი რისკ-ფაქტორია ხანძარი. აღნიშნული პრობლემა აგრეთვე აღიარებულია საერთაშორისო მასშტაბით. მსოფლიოს გვირაბებში მომხდარი ძლიერი ხანძრების შემდეგ, ევროკავშირმა განსაკუთრებით გაამახვილა ყურადღება ტრანსევროპულ ქსელზე (TEN), რომლის ფარგლებში არსებული და ასაშენებელი გვირაბების უსაფრთხოება პირველი პრიორიტეტია.

TEN-ის 500 მ-ზე უფრო გრძელი გვირაბებისათვის ევროპის პარლამენტმა და ევროპის საბჭომ გამოსცა დირექტივა EC 2004/54 უსაფრთხოების აუცილებელი მინიმალური დონის შესახებ. ევროკავშირის ქვეყნებში ასეთი გვირაბების ჯამური სიგრძე 1000 კმ-ზე მეტია. ევროკავშირის ქვეყნებს მიეცათ დაბეჭითებითი რეკომენდაცია, რომ დირექტივის მოთხოვნები გააგრძელონ ისეთ გვირაბებზეც, რომლებიც არ შედიან TEN-ის ფარგლებში. მინიმალური დონე ფაქტობრივად გვირაბებზე წაყენებული საორგანიზაციო და ტექნიკური მოთხოვნებია სახანძრო უსაფრთხოების კუთხით.

ევროპის პარლამენტისა და ევროპის საბჭოს EC 2004/54 დირექტივის მიხედვით, ევროკავშირის ქვეყნებში არსებული საავტომობილო გვირაბებისათვის, სახანძრო

უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფი ხარჯები 2.6-6.3 მლრდ ევროს ფარგლებში იცვლება. 2.6 მლრდ ევრო შეესაბამება სავენტილაციო სისტემებისა და მათი გაუმჯობესების ტექნოლოგიას, რომელიც შედარებით ნაკლები ხარჯებით ხასიათდება მითითებული ღირებულების შესაბამისად [1-4].

პრობლემის არსი არის ჰაერის ნაკადების აეროდინამიკის ცვალებადობის კანონზომიერებებისა და ვენტილაციის მნიშვნელოვანი ტენოლოგიური პარამეტრების დადგენა გვირაბში ხანძრის გავლენით, როცა ცვალებადია გვირაბის დახრილობა, სითბოს გამოყოფის მაჩვენებელი, გვირაბის განივი კვეთი, გვირაბის სიგანის ფარდობა სიმაღესთან, გვირაბის ტრანსპორტით შევსების კოეფიციენტი, აგრეთვე გართულებულია გვირაბის აეროდინამიკა დამატებითი წინააღმდეგობების ჩართვით ტრანსფორმირებადი ელემენტების სახით, რომლებიც ემსახურებიან ევაკუაციის პერიოდის გაზრდას. პრობლემის გადაჭრით გაუმჯობესდება ვენტილაციის ტექნოლოგია ხანძრის პირობებში სიცოცხლის გადარჩენის მიზნით. შესაბამისად, მოცემული კვლევების შედეგები არის სოციალური მიმართულების და ემსახურება უსაფრთხოების ამაღლებას.

## 2. მოდელები და ანალიზის მეთოდოლოგია

### 2.1. ფრუდის კრიტერიუმის გამოყენებით ფიზიკური მოდელირების აღწერა

ფრუდის კრიტერიუმით დამოდელების სტრატეგია ფართოდ გამოიყენება ხანძრების ექსპერიმენტებში. მისი განსაკუთრებულობა ისაა, რომ ფრუდის რიცხვი, რომელიც ახასიათებს ინერციულობისა და ტივტივადობის ძალებს, ექსპერიმენტში პირდაპირ იქნება შენარჩუნებული. ფრუდის მიხედვით მოდელირების შემთხვევაში ტემპერატურათა ველი ერთნაირია, ხოლო სითბოს გამოყოფის მასშტაბი მოდელსა და ნატურას შორის გეომეტრიული მასშტაბის მიხედვით შემდეგნაირად გამოისახება

$$\frac{Q_m}{Q_n} = \left( \frac{\ell_m}{\ell_n} \right)^{\frac{5}{2}}, \quad (1)$$

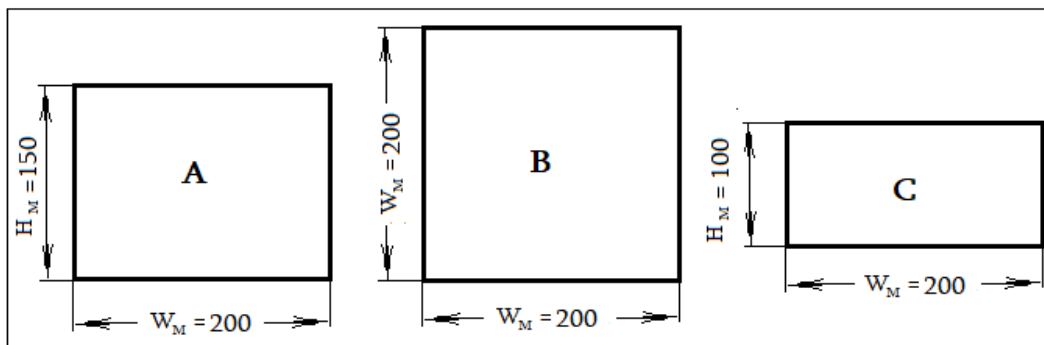
$$\frac{u_m}{u_n} = \left( \frac{\ell_m}{\ell_n} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

სადაც  $Q_m$ ,  $Q_n$  - შესაბამისად არის კონვექციური სითბოს გამოყოფის მაჩვენებელი მოდელზე და ნატურაში, კვტ;  $\ell_m$ ,  $\ell_n$  - გვირაბის სიგრძე მოდელზე და ნატურაში, მ;  $u_n$ ,  $u_m$  - ჰაერის სიჩქარე მოდელზე და ნატურაში, მ/წმ.

ექსპერიმენტული სერიები შესრულდა სამი სახის სხვადასხვა განივი კვეთის მქონე გვირაბის ფიზიკურ მოდელზე (იხ. ნახ. 1). შესწავლილი იქნა ხანძრის გავლენა გრძივი

ვენტილაციის პირობებში კრიტიკულ სიჩქარეზე, უკუდინების სიგრძეზე და ვენტილაციის კოლაფსის მოსალოდნელობაზე ტრანსპორტისა და ტრანსფორმირებადი ელემენტების ჩართვით მოდელზე და მათ გარეშე. ტრანსფორმირებადი ელემენტით გვირაბის კვეთის გადაფარვის მაჩვენებელი არის 0-100 % ფარგლებში.

ყველა მათგანისათვის საერთო არის ნახ. 2-9-ზე გამოსახული სქემები. როგორც ადვილი მისახვედრია, ვარიანტების მიხედვით ცვალებადი არის გვირაბის განივი კვეთის ფართობი. ფიზიკურ მოდელზე გვირაბის სიგრძე არის 12 მ (ნატურაში 480 მ), რომელსაც მიწოდება ჰაერი განცალკევებული ინვენტარული ჰაერსატარით (იხ. ნახ. 7, 8).



ნახ. 1. გვირაბის A, B და C ტიპის გვირაბის მოდელის განივი კვეთი, ხაზოვანი მასშტაბი 1:40; მოდელის განივი კვეთის ფართობები შესაბამისად: 0.03; 0.04 და 0.02 მ<sup>2</sup>, რომლებიც შეესაბამებან განივი კვეთის ფართობებს ნა ტურაში 48; 64 და 32 მ<sup>2</sup>

A, B და C ტიპის მოდელის სწორკუთხა განივი კვეთი ალბათია ტრანსფორმირებადი ელემენტით გვირაბის გადაფარვის პროცენტის შედარებით ზუსტი განსაზღვრისათვის. შესაბამისად, გვირაბის ფორმის გავლენა საძიებელ სიდიდეებზე: კრიტიკულ სიჩქარესა და უკუდინების სიგრძეზე, ფიზიკური ექსპერიმენტებით გათვალისწინებული არაა. აღნიშნული მოხდება რიცხვითი მოდელირებით.

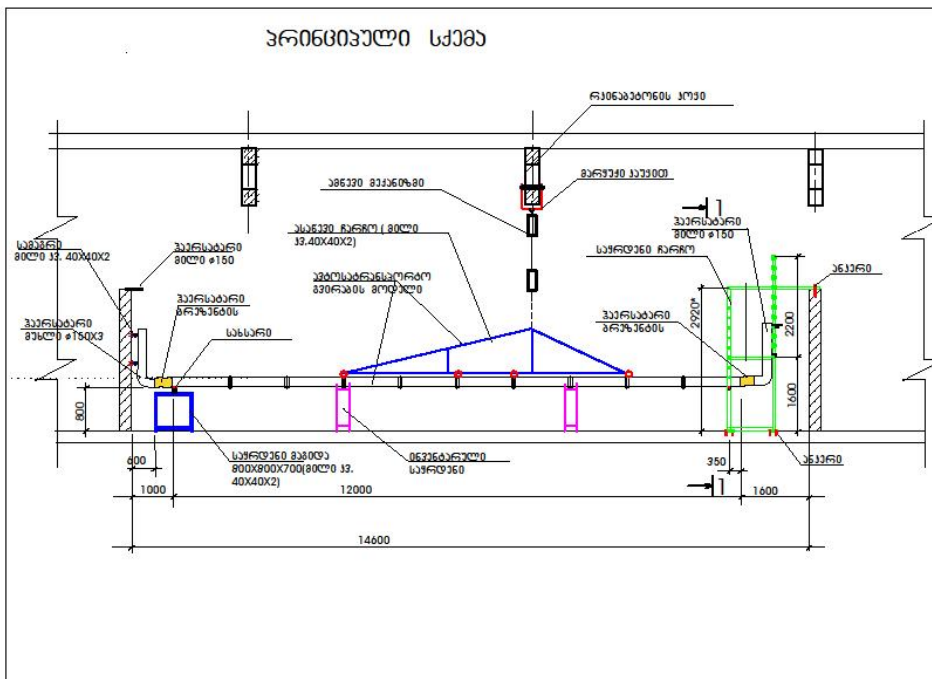
ჩვენ ერთმანეთისაგან ვმიჯნავთ ფრუდის რიცხვის გამოყენების მოსახერხებლობას მოდელირებისათვის და ფრუდის რიცხვის მუდმივი სიდიდით სარგებლობის დაუშვებლობას ყველა სიმძლავრის ხანძრისათვის [5]. ამასთან დაკავშირებით ლიტერატურაში [6] აგრეთვე აღნიშნულია, რომ ფრუდის კრიტიკული  $Fr = 4.5$  რიცხვის გამოყენება ყველა სიმძლავრის ხანძრის პირობებში არ არის მიზანშეწონილი კვამლის კონტროლის მიზნით კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების სიგრძის გამოსათვლელად. აღნიშნული აზრი ნაწილობრივ გატარებულია ნაშრომებში [7-13].

ფიზიკური მოდელირებისათვის ვირჩევთ მხოლოდ ხაზოვან მასშტაბს  $Ml = l_m/l_n = W_M/W_N = H_M/H_N = 0.025$ ;

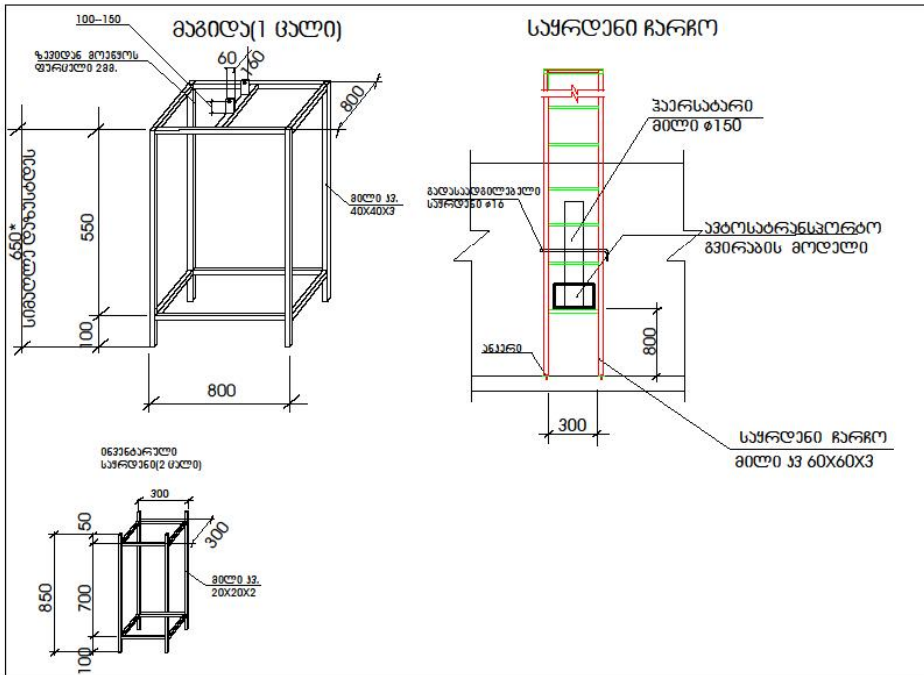
მოდელირების დანარჩენი მასშტაბები გამოთვლას ექვემდებარება მოცემული ფორმულების მიხედვით:

სითბოს გამოყოფის მაჩვენებლის მასშტაბი (1) ფორმულის თანახმად  $M_Q = 0.0000988$ ;  
 ვენტილაციის სიჩქარის მასშტაბი (2) ფორმულის თანახმად  $M_U = 0.158$ .  
 აღნიშნული მასშტაბები შენარჩუნებული იქნება სამივე ტიპის მოდელზე.

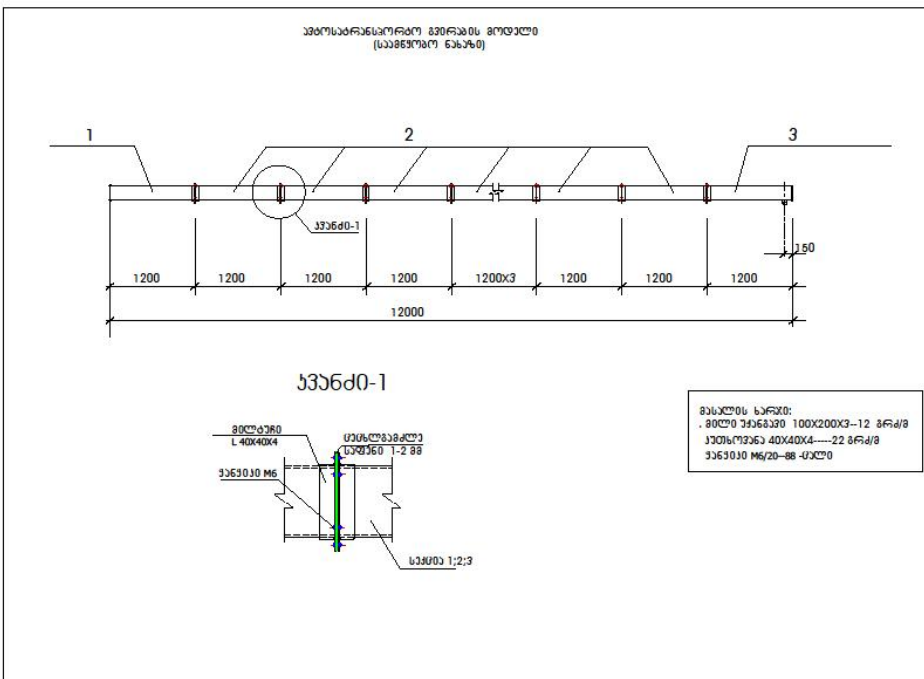
გვიარაბის მოდელი დამზადებულია 1 მმ სისქის უჟანგავი ფოლადის ფურცლებისაგან. ყველა მოდელისათვის საერთოა ცენტრალური ნაწილში მოთავსებული ორი სახის ტრანსპორტი: Nissan Patrol 2014, რომლის ზომებია ნატურაში: 5160X1995X1938 მმ და „ევროტენტი“, რომლის ზომებია 13600X2450X2450 მოდელირების საზოგადოებრივი მასშტაბის



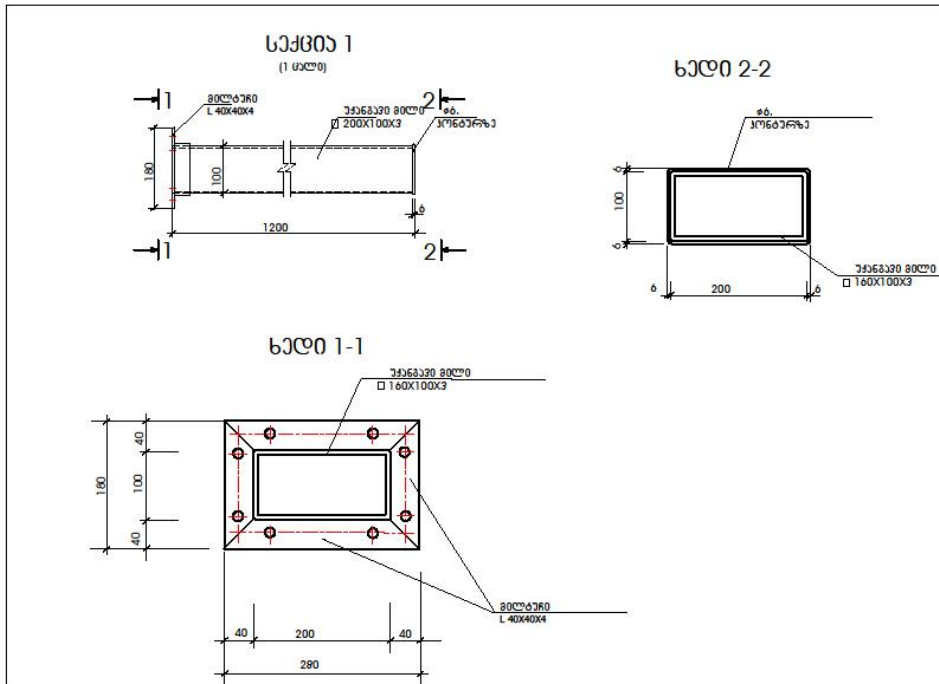
ნახ. 2. გვიარაბის მოდელის, ასანე-დასანევი მექანიზმის და აქსესუარების განლაგების საერთო ხედი



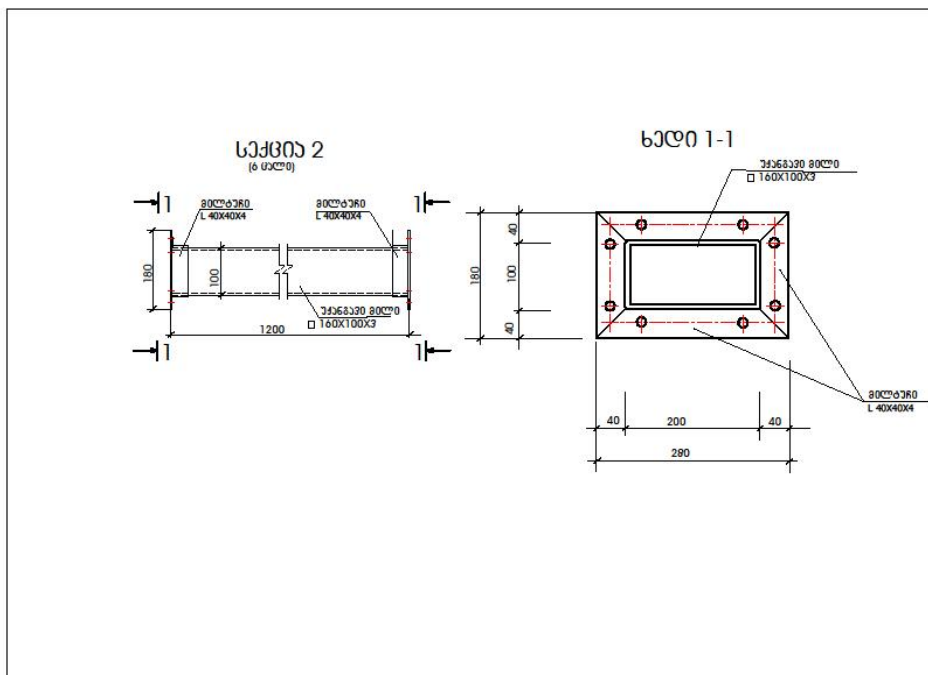
ნახ. 3. გვირაბის მოდელის აქსესუარები



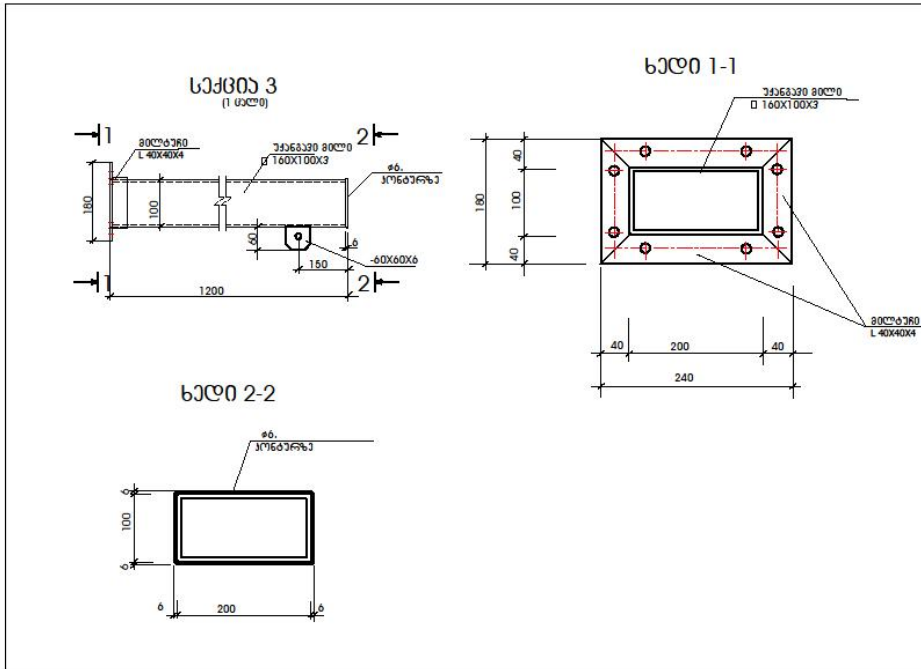
ნახ. 4. ავტოსატრანსპორტო გვირაბის მოდელის ცალკეული კვანძების შეერთების სქემა



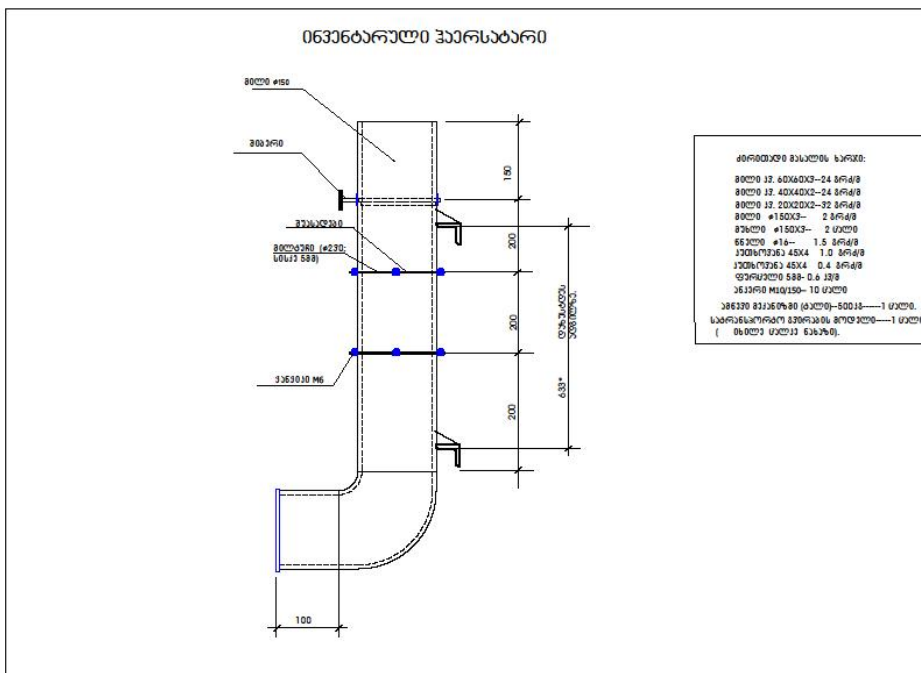
ნახ. 5. გვირაბის მოდელის 1-ლი სექცია



ნახ. 6. გვირაბის მოდელის მე-2 სექცია

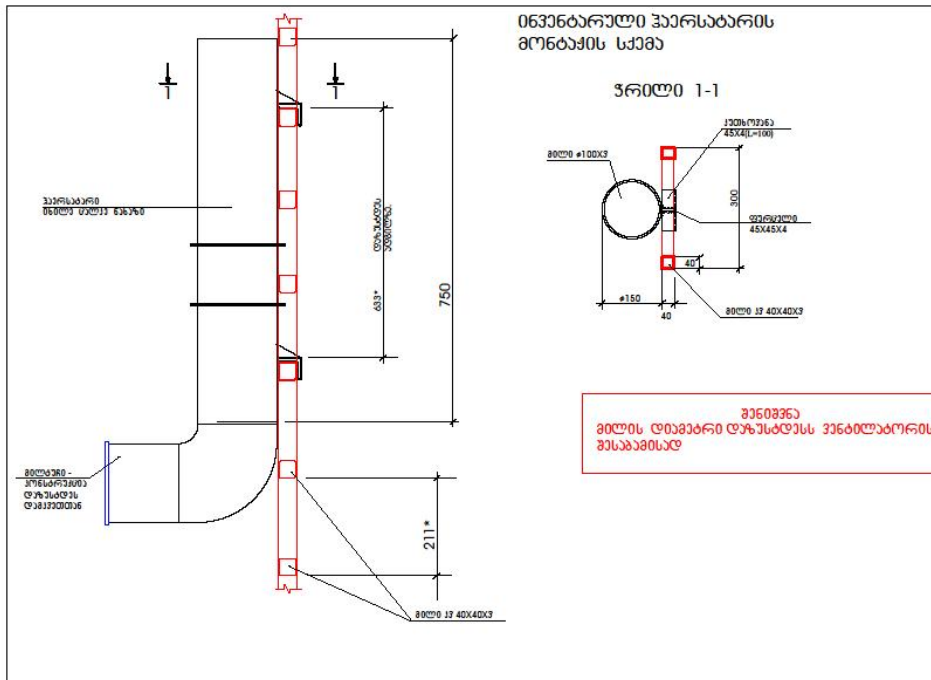


ნახ. 7. გვირაბის მოდელის მე-3 სექცია



ნახ. 8. ინვენტარული ჰაერსატარი





ნახ. 9. ინვენტარული ჰაერსატარის მონტაჟის სქემა

მხედველობაში მიღებით მოდელზე ტრანსპორტის ზომები იქნება: Nissan Patrol 2014-სათვის 130X50X50 მმ, „ვეროტენტისათვის“ 340X60X60 მმ. ტრანსპორტი გვირაბში განლაგებული იქნება სიმეტრიულად. ტრანსპორტის ფსკერსა და გვირაბის იატაკს შორის მანძილი მოდელზე იქნება 0.02 მ (20 მმ), რაც ნატურაში შეესაბამება 0.8 მ (800 მმ). ხანძრის კერიდან ორივე მხარეზე 3.25 მ მანძილზე განლაგდება ტრანსფორმირებადი ელემენტი, რაც ნატურაში შეესაბამება მათ შორის 300 მ მანძილს.

გვირაბში სტაბილური ტურბულენტურობის უზრუნველსაყოფად გამოყენებული არის სტატიკური წნევის კამერა, სიგრძით 1 მ, სიგანით 0.5 მ და სიმაღლით 0.5 მ, რომელშიც ჰაერის მინოდება ხდება არხული ვენტილატორის მეშვეობით, რომლის ხარჯი არის 20-150 მ<sup>3</sup>/სთ-ის ფარგლებში A ტიპის მოდელისათვის, ხოლო მაქსიმალური სტატიკური წნევა - 150 პა-მდე. ცეცხლის წყარო იქნება ფოროვანი სანთურები ზედაპირის ფართობით 130X50 მმ და 340X60 მმ. ცეცხლის წყაროს ზედაპირი იქნება გვირაბის იატაკის დონეზე. სათბობად გამოყენებულია ბუნებრივი აირი, რომლის ხარჯის გაზომვა ხდება 1 % სიზუსტით. გვირაბის კვეთში განთავსებულია თითო და ორ-ორი ფოროვანი სანთური. მოდელზე სითბოს გამოყოფის მაჩვენებლის გაანგარიშება ხდება აირის ხარჯის მიხედვით. გვირაბში ჰაერის ხარჯის გაზომვა ხდება ხარჯის საზომით, რომლის სიზუსტე არის აგრეთვე 1 %, ხოლო ჰაერის ხარჯი იცვლება

ფარგლებში 20-150 მ<sup>3</sup>/სთ. ჰაერის სიჩქარე არ იზომება, ხდება მისი გამოთვლა ჰაერის ხარჯისა და გვირაბის განივი კვეთის მიხედვით.

## 2.2. მოდელური გვირაბის მაჩვენებლები ნატურაში

ნახ. 1-ზე გამოსახული A ტიპის გვირაბის მაჩვენებლები ნატურაში იქნება: განივი კვეთი  $S_N = 48 \text{ მ}^2$ ; გვირაბის სიგანე  $W_N = 8 \text{ მ}$ ; სიმაღლე  $H_N = 6 \text{ მ}$ ; იმავე მაჩვენებლებს მოდელზე შეესაბამება  $S_M = 0.03 \text{ მ}^2$ ; სიგანე  $W_M = 0.20 \text{ მ}$ ; სიმაღლე  $H_M = 0.15 \text{ მ}$ .

მოდელისა და ნატურის ხაზოვანი ზომები A ტიპის გვირაბისათვის, განივი კვეთის ფართობებთან ერთად შეტანილია ცხრილში N1. დანარჩენი ტიპის გვირაბებისათვის ანალოგიური ცხრილი არ მოგვაქვს.

ცხრილი 1

მოდელისა (მ) და ნატურის (ნ) ხაზოვანი ზომები

დასახელება	სიგრძე, მ (მმ)	სიგანე, მ (მმ)	სიმაღლე, მ (მმ)	განივი კვეთი, მ <sup>2</sup>	შენიშვნა
გვირაბი (ნ)	480 (480,000)	8.0 (8,000)	6.0 (6,000)	48.0	-
გვირაბი (მ)	12(12,000)	0.20 (200)	0.15 (150)	0.03	-
ტრანსპორტი (ნ)	13.6 (13,600)	2.45 (2,450)	2.45 (2,450)	6.0	„ევროტენტი“
ტრანსპორტი (მ)	0.34 (340)	0.0613 (613)	0.0613 (613)	0.00375	„ევროტენტი“
ტრანსპორტი (ნ)	5.16 (5,160)	1.995 (1,955)	1.938 (1,938)	3.87	Nissan Patrol 2014
ტრანსპორტი (მ)	0.13 (130)	0.05(50)	0.05(50)	0.0025	Nissan Patrol 2014

გვირაბის სიგანის ფარდობა გვირაბის სიმაღლესთან სხვადასხვა ტიპის მოდელისათვის იქნება 1.0-2.0 ფარგლებში. კერძოდ: A ტიპის გვირაბისათვის  $AR = W_M/H_M = 1.33$ , B ტიპის გვირაბისათვის  $AR = 1.0$  და C ტიპის გვირაბისათვის  $AR = 2.0$ .

## 2.3. ტრანსპორტით გვირაბის შევსების კოეფიციენტი

ტრანსპორტით გვირაბის შევსების კოეფიციენტი  $\alpha$  სხვადასხვა ტიპის მოდელისათვის იანგარიშება

$$\alpha = \frac{F}{f}, \quad (3)$$

სადაც  $F$  არის ტრანსპორტის განივი კვეთი, მ<sup>2</sup>;  $f$  - გვირაბის განივი კვეთი, მ<sup>2</sup>.

ტრანსპორტით გვირაბის შევსების კოეფიციენტის ცვალებადობის ფარგლები ექსპერიმენტების მიხედვით მოცემულია ცხრილში 2.

ცხრილი 2

გვირაბის შევსების  $\alpha$  კოეფიციენტის რიცხვითი სიდიდეები

გვირაბის მოდელის ტიპი	$\alpha$ -ს რიცხვითი სიდიდეები ტრანსპორტის რიცხვის მიხედვით გვირაბის მოდელის კვეთში, %		
	1 Nissan Patrol 2014	1 „ვეროტენტი“	2 „ვეროტენტი“
A	8.3	12.5	25.0
B	6.3	9.4	18.8
C	12.50	18.75	37.50

A ტიპის გვირაბისათვის შევსების კოეფიციენტი  $\alpha = 12.5-25.0$  %; B ტიპის გვირაბისათვის  $\alpha = 9.0-18.0$  % და C ტიპის გვირაბისათვის  $\alpha = 18.75-37.50$  %.

ამგვარად, ტრანსპორტით გვირაბის შევსების კოეფიციენტის ცვალებადობის ფარგლები დაგეგმილ ექსპერიმენტებში არის 6.3-37.50 %.

#### 2.4. ჰაერის სიჩქარეები მოდელზე და ნატურაში

A და B ტიპების გვირაბისათვის ჰაერის ხარჯი იქნება 20-150 მ<sup>3</sup>/სთ ფარგლებში, ხოლო C ტიპის გვირაბისათვის 20-100 მ<sup>3</sup>/სთ ფარგლებში.

A ტიპის გვირაბისათვის 20 მ<sup>3</sup>/სთ ჰაერის ხარჯის შემთხვევაში მოდელზე სიჩქარე იქნება  $U_m = 0.185$  მ/წმ; რასაც (2) ფორმულის თანახმად შეესაბამება სიჩქარე ნატურაში  $U_n = 1.2$  მ/წმ; 150 მ<sup>3</sup>/სთ ჰაერის ხარჯის შემთხვევაში მოდელზე სიჩქარე იქნება  $U_m = 1.389$  მ/წმ; რასაც (2) ფორმულის თანახმად შეესაბამება სიჩქარე ნატურაში  $U_n = 8.8$  მ/წმ.

სამივე ტიპის გვირაბის მოდელისათვის კრებსითი მონაცემები შეტანილია ცხრილში 3.

ცხრილი 3

ჰაერის სიჩქარის რიცხვითი სიდიდეების ცვალებადობის ფარგლები მოდელზე და ნატურაში

გვირაბის მოდელის ტიპი	ჰაერის ხარჯი, მ <sup>3</sup> /სთ	ჰაერის სიჩქარე მოდელზე, მ/წმ	ჰაერის სიჩქარე ნატურაში, მ/წმ
A	20-150	0.185-1.389	1.2-8.8
B	20-150	0.139-1.041	0.9-6.6
C	20-100	0.278-1.389	1.8-8.8

მოდელზე დაბალი სიჩქარეებით ნატურაში გაცილებით უფრო მაღალი სიჩქარეების უზრუნველყოფას განაპირობებს ფრუდის რიცხვი, რომელიც ამ მხრივ რადიკალურად განსხვავდება რეინოლდსის რიცხვისაგან [დავამატოთ ქუთათელაძე?].

## 2.5. სითბოს გამოყოფის მაჩვენებელი მოდელზე და ნატურაში

განსაკუთრებით გამოკვეთილია ფრუდის რიცხვით დამოკიდებულების მოსახერხებლობა სითბოს გამოყოფის მაჩვენებლის მოდელური და ნატურული სიდიდეების შედარების შემთხვევაში. კერძოდ, ჰიარკის რეკომენდაციების შესაბამისად, საავტომობილო გვირაბების სავენტილაციო სისტემები დაპროექტებული უნდა იყოს 30 მგვტ სიმძლავრის ხანძრის პროდუქტების განეიტრალებიდან გამომდინარე [2, 3]. ფრუდის რიცხვის გამოყენებით 30 000 კვტ ხანძრის დამოკიდებულებას, ზემოთ მითითებული სათანადო მასშტაბის  $Ma = 0.0000988$  თანახმად, მოდელზე ესაჭიროება მხოლოდ 2.964 კვტ სიმძლავრე.

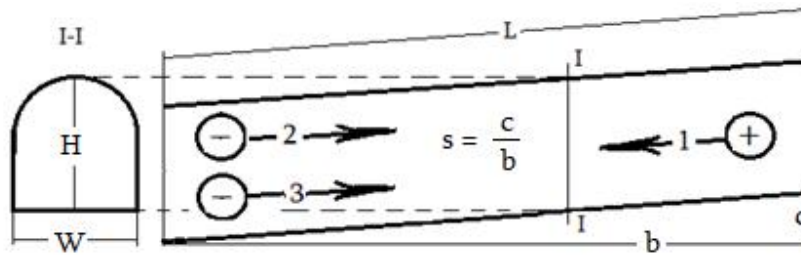
ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, მოცემულ გვირაბის მოდელზე ვენტილაციის უფრო მეტი სიჩქარისა და ხანძრის უფრო მეტი სიმძლავრის დამოკიდებულების სიმარტივე და ოპერატიულად განხორციელების შესაძლებლობა მტკიცებას არ საჭიროებს, რადგან ამის გარეშეც აშკარაა. კერძოდ, ფრუდის კრიტერიუმის გამოყენებით შესაძლებელია ხანძრის ექსპერიმენტების ჩატარება შედარებით უსაფრთხო ნაკლები ტემპერატურების პირობებში.

## 2.6. ვენტილაციის დადებითი და უარყოფითი მიმართულება

იმის გამო, რომ ხანძრის მიერ აღძრული დეპრესია და ვენტილატორის დეპრესია ალგებრულად იკრიბება, შესაძლებელია კანონზომიერი ხასიათი მიეცეს დახრილ გვირაბებში სავენტილაციო ნაკადის მოძრაობის დადებით და უარყოფით მიმართულებების შერჩევის საკითხს.

ვინაიდან ხანძრის მოვლენა უარყოფითია საზოგადოდ, ამიტომ ხანძრის მიერ აღძრული წევის მიმართულება უარყოფითად უნდა ჩაითვალოს. შესაბამისად, ვენტილაციის დადებითი მიმართულება იქნება საპირისპირო, ანუ მაშინ, თუ სუფთა ჰაერის შემოსასვლელი ჰიფსომეტრიულად უფრო მაღლაა განლაგებული, ვიდრე ხანძრის კერა. მაშასადამე, სუფთა ჰაერის მოძრაობის დადებითი მიმართულება არის დადამავალი, ხოლო უარყოფითი მიმართულება - აღმავალი. წვის პროდუქტების მოძრაობის ბუნებრივი მიმართულება ყოველთვის არის აღმავალი და უარყოფითი (იხ. ნახ. 10).

სხვადასხვა სამეცნიერო ლიტერატურაში სავენტილაციო ნაკადის მოძრაობის დადებით და უარყოფითი მიმართულებად, პირობითად, მიღებულია როგორც აღმავალი, ისე დადამავალი ნაკადები, რაც ზოგჯერ დიდ უხერხულობას ქმნის ცალსახობის თვალსაზრისით.



ნახ. 10. სუფთა ჰაერისა და წვის პროდუქტების მოძრაობის მიმართულებები გვირაბის გრადიენტის მიხედვით: 1 - სუფთა ჰაერის მოძრაობის დადებითი მიმართულება (დაღმავალი); 2 - სუფთა ჰაერის მოძრაობის უარყოფითი მიმართულება (აღმავალი); 3 - წვის პროდუქტების მოძრაობის ბუნებრივი მიმართულება (უარყოფითი, აღმავალი); L - გვირაბის სიგრძე, მ; W - გვირაბის სიგანე, მ; H - გვირაბის სიმაღლე, მ; b - გვირაბის სიგრძის ჰორიზონტალური პროექცია, მ; c - დახრილობის ვერტიკალური სიმაღლე, მ; s - გვირაბის დახრილობა, %

## 2.7. გვირაბის დახრილობის უზრუნველყოფა

გვირაბის დახრილობის ფარგლებია  $-10^{\circ} < s < 10^{\circ}$ , ყოველი გრადუსი იძლევა 1.75 % დახრილობას. დახრილობის უზრუნველყოფა მოხდება სპეციალური ტელეფერითა და მოდელის დამჭერი მონწყობილობებით (იხ. ნახ. 2 და 3).

მოდელის თავისუფალ ბოლოს აქვს შვერილი, რომელიც მოთავსდება და დაფიქსირდება სათანადო ბუდეში. ჰორიზონტალური სიბრტყიდან მოდელის გადახრა გრადუსების მიხედვით მოცემულია ცხრილში 4.

ცხრილი 4

მოდელის ვერტიკალური გადახრა ჰორიზონტალური სიბრტყიდან  $-10^{\circ} < s < 10^{\circ}$   
დახრილობის უზრუნველსაყოფად

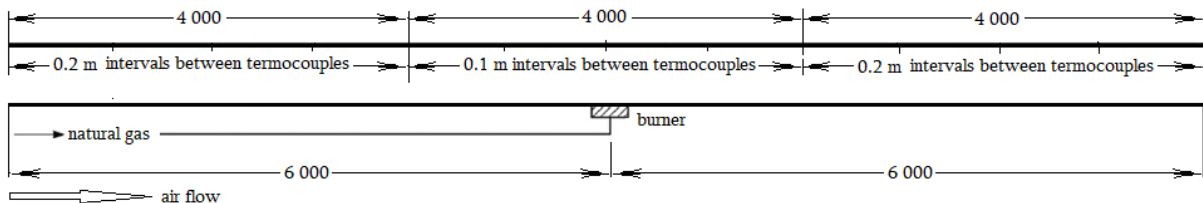
დახრის კუთხე, გრადუსი	ვერტ. მანძილი, მ	დახრის კუთხე, გრადუსი	ვერტ. მანძილი, მ	დახრის კუთხე, გრადუსი	ვერტ. მანძილი, მ	დახრის კუთხე, გრადუსი	ვერტ. მანძილი, მ
-1	-0.21	-6	-1.25	1	0.21	6	1.25
-2	-0.42	-7	-1.46	2	0.42	7	1.46
-3	-0.63	-8	-1.67	3	0.63	8	1.67
-4	-0.84	-9	-1.88	4	0.84	9	1.88
-5	-1.05	-10	-2.08	5	1.05	10	2.08

ამგვარად, ექსპერიმენტული მონწყობილობის ვერტიკალურ სიბრტყეში მოძრაობის ამპლიტუდა შეადგენს 2.08 მ, ხოლო განშლა არის 4.16 მ.

## 2.8. უკუდინების განსაზღვრა

უკუდინების განსაზღვრა ხდება ტემპერატურის მიხედვით, უჟანგავი ფოლადის K ტიპის თერმონწყვილებით. თერმონწყვილების განლაგების სქემა მოცემულია ნახაზზე 11. კრიტიკული სიჩქარე განისაზღვრება უკუდინების სიგრძის ანალიზის გზით, სათანადო მრუდის ექსტრაპოლაციით. ყველა მოდელურ გვირაბში თერმონწყვილები დამონტაჟებული იქნება ჭერს ქვემოთ 20 მმ დაშორებით როგორც აღმავალი, ისე დაღმავალი ნაკადის მთელ სიგრძეზე. გვირაბის ცენტრიდან ორივე მხარეზე 2-2 მ სიგრძის მონაკვეთზე (სულ 4მ სიგრძეზე) დამონტაჟდება 40 ცალი თერმონწყვილი ისე, რომ მათ ღერძებს შორის მანძილი იქნება 0.1 მ. მოდელური გვირაბის დანარჩენ სიგრძეზე აგრეთვე დამონტაჟდება თერმონწყვილები, რომელთა შორის მანძილი იქნება 0.2 მ. სულ თერმონწყვილების რიცხვი ერთი რომელიმე ტიპის მოდელისათვის შეადგენს 80 ცალს.

ანათვლების აღება თერმონწყვილებიდან ხდება დაკვირვებების ონლაინ-სისტემით.



ნახ. 11. თერმონწყვილების განლაგება ექსპერიმენტული დანადგარის სიგრძის მიხედვით

ექსპერიმენტების მიზანი არის ტრანსფორმირებადი სისტემების გავლენის შესწავლა კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების სიგრძის რიცხვითი სიდიდეების ცვალებადობაზე და სათანადო კორელაციების დამუშავება გვირაბის ტრანსპორტით ჩახერგვის მხედველობაში მიღებით. ხანძარი ტრანსპორტის მოდელის შიგნით კი არ იქნება დამოდელებული, არამედ გარეთ, მოდელის ქვემოთ და ალი გარს შემოუვლის სატრანსპორტო საშუალების მოდელის მთელ გარე პერიმეტრს ან მის ნაწილს დაგეგმილი ამოცანების მიხედვით.

კრიტიკული სიჩქარე დახრილ გვირაბში შესწავლილი იქნება აქ აღწერილი ნატურული ექსპერიმენტებისა და რიცხვითი ექსპერიმენტების (კომპიუტერული მოდელირების) მიხედვით. აღნიშნული გაკეთდება ნატურული ექსპერიმენტებისა და რიცხვითი ექსპერიმენტების ვალიდაციისა და სათანადო დასკვნების გაკეთების მიზნით. დახრილობა ექსპერიმენტული გვირაბისა იქნება 10 გრადუსამდე. რამდენადაც ჩვენთვის ცნობილია, ნორვეგიაში არის 8 გრადუსი დახრილობის გვირაბი, ხოლო ჩინეთში სატრანსპორტო გვირაბების მაქსიმალური დახრილობა არის 7 გრადუსამდე [14].

წინასწარ მხოლოდ იმის აღნიშვნა არის შესაძლებელი, რომ გვირაბის სიგრძის მიხედვით, დახრილობიდან გამომდინარე, წვის პროდუქტები ასიმეტრიულად ვრცელდება და აღნიშნული ასიმეტრია უფრო მკვეთრად არის გამოხატული ძლიერად დახრილ გვირაბებში. შესაბამისად, აღნიშნულმა ექსპერიმენტებმა უნდა გვიჩვენოს სატრანსპორტო გვირაბებისათვის დამახასიათებელი რეალობები.

აქ შეგნებულად არ ვამახვილებთ ყურადღებას სამთო მომპოვებელი გვირაბებისათვის, რომელთა დახრილობა გაცილებით უფრო დიდია და გვხვდება აგრეთვე ვერტიკალური დიდი სიგრძის ჭაურები.

## 2.9. გრადიენტ-ფაქტორის ექსპერიმენტული განსაზღვრა

გრადიენტ-ფაქტორის ექსპერიმენტული განსაზღვრა ხდება ფორმულით

$$K_g = \frac{u_{c,\theta}}{u_{c,0}}, \quad (4)$$

სადაც  $u_{c,0}$  არის კრიტიკული სიჩქარე ნულოვანი დახრილობისას, მ/წმ;  $u_{c,\theta}$  - კრიტიკული სიჩქარე  $\theta$  კუთხით დახრილობისას. შევნიშნოთ, რომ ფორმულა (4)-ის გამოყენება შესაძლებელია როგორც მათემატიკური, ისე ფიზიკური მოდელირების შედეგების ანალიზისა და კორელაციისათვის.

## 2.10. სავენტილაციო სისტემის მოსალოდნელი კოლაფსის ექსპერიმენტული შემოწმება

ძლიერი ხანძრის პირობებში, გარკვეული პერიოდის შემდეგ, ვენტილატორების მუშაობის გავლენა სავენტილაციო ნაკადზე კლებადობით ხასიათდება იმისდა მიუხედავად, თუ რა მიმართულებით განვითარდება 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 გვირაბის სავენტილაციო სისტემის დეპრესიის თანაზომადი დომინანტური დინამიკური წნევის აღძვრისა და გავრცელების პროცესი. აღსანიშნავია, რომ ხანძრის მიერ განვითარებული დინამიკური წნევა ვენტილატორის მიერ განვითარებულ წნევასთან ალგებრულად იკრიბება.

ხანძრის სიძლიერის გავლენა ვენტილაციაზე სხვადასხვაგვარად არის შეფასებული სამეცნიერო ლიტერატურაში, შედარებით ახლოსაა ამ პროექტში გატარებულ იდეასთან ნაშრომში [15] მიღებული შედეგები.

გვირაბის დახრილობისა და ხანძრის გამოყოფის მაჩვენებლის ცვალებადობით დაგეგმილია აქნიშნულ საკითხში სიცხადის შეტანა. თეორიული ბაზა იქნება კლაპეირონის განტოლება იდეალური გაზებისათვის.

## შედეგები და მოდელის ვალიდაცია

ფიზიკური ექსპერიმენტების შესრულების პარალელურად მოხდება იმავე ამოცანების რიცხვითი მოდელირება და შედეგების შედარების გზით დაზუსტდება სამოდულო უჯრედების

ზომები. სრულმასშტაბიანი რიცხვითი მოდელირების შესრულება უფრო საფუძვლიანად იქნება შესაძლებელი სამოდულო უჯრედების დაზუსტების თვალსაზრისით.

დაგეგმილი კვლევის შედეგები ტრანსფორმირებადი სისტემები, კრიტიკული სიჩქარის, უკუდინების სიგრძისა და გრადიენტ-ფაქტორის ცვალებადობის კანონზომიერებები გამოსაყენებელი იქნება საქართველოს სატრანსპორტო გვირაბების უსაფრთხო ექსპლუატაციისათვის. ქვეყნის ეკონომიკის განვითარება და მდგრადობა კი დიდად არის დამოკიდებული სატრანსპორტო ქსელის გამართულ და შეუფერხებელ მუშაობაზე. გვირაბი სატრანსპორტო ქსელში არის საკვანძო ელემენტი, რადგან მისი მუშაობით ხდება გზის ყველაზე რთული უბნების დაძლევა. ამიტომ დაგეგმილი კვლევები ცალსახად მნიშვნელოვანი უნდა იყოს საქართველოს პირობებისათვის და აღნიშნული მასშტაბი არ აკნინებს მოსალოდნელი შედეგების მნიშვნელობას. თუმცა მიგვაჩნია, რომ პრობლემა უფრო მნიშვნელოვანია და მიღებული შედეგების გამოყენება შესაძლებელი უნდა იყოს სხვა ანალოგიურ შემთხვევებშიც.

როგორც ცნობილია, სირთულის გამო დახრილ გვირაბებში კრიტიკული სიჩქარე და უკუდინების სიგრძე ნაკლებად არის შესწავლილი და მათი სიდიდების გამოთვლა ხდება ჰორიზონტალური გვირაბებისათვის არსებული შედეგების გამოყენებით [19].

დახრილ გვირაბში კრიტიკული სიჩქარის  $u_c$  საანგარიშო ფორმულაში გამოყენებულია ჰორიზონტალური გვირაბისათვის კრიტიკული სიჩქარის რიცხვითი სიდიდის  $u_{c,0}$ -ის მიხედვით შემდეგი განტოლებით [14]

$$u_{c,\theta} = K_g u_{c,0} \quad (5)$$

სადაც  $K_g$  არის გრადიენტ-ფაქტორი, რომელიც გამოიყენება ხანძრების შემთხვევაში დახრილი გვირაბებისათვის.

NFPA 502 გვთავაზობს გრადიენტ-ფაქტორის განტოლებას დახრილი გვირაბებისათვის [20]

$$K_g = 1 + 0.0374s^{0.8}, \quad (6)$$

სადაც  $s$  არის გვირაბის დახრილობა, %, რომელიც განისაზღვრება ანევის სიმაღლის ფარდობით ჰორიზონტალურ სიგრძესთან (იხ. ნახ. 2). სხვა სიტყვებით, თუ კუთხე არის  $\theta$ , მაშინ გვირაბის დახრილობა არის  $tg\theta$ . ფორმულაში (6)  $s$  არის დახრილობა, გამოსახული პროცენტებში, ანუ  $s = 100tg\theta$ .

კრიტიკული სიჩქარის გამოთვლა შესაძლებელია ფორმულით

$$u_c = k \left( \frac{g \dot{Q}_c H}{\rho_0 c_p T A} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

სადაც  $k$  არის პროპორციულობის მუდმივა;  $g$  - გრავიტაციული აჩქარება, მ/წმ<sup>2</sup>;  $\dot{Q}_c$  - ხანძრის შედეგად გამოყოფილი კონვექციური სითბო, კვტ;  $H$  - გვირაბის სიმაღლე, მ;  $\rho_0$  - გარე ჰაერის სიმკვრივე, კგ/მ<sup>3</sup>;  $c_p$  - ჰაერის კუთრი თბოტევადობა, კჯ/(კგ·K);  $T$  - კვამლის საშუალო ტემპერატურა, K;  $A$  - გვირაბის განივი კვეთის ფართობი, მ<sup>2</sup>.

პროპორციულობის მუდმივა განისაზღვრება ფორმულით

$$k = Fr_C^{-1/3}, \quad (8)$$



სადაც  $Fr_c$  არის ფრუდის კრიტიკული რიცხვი, რომელიც განისაზღვრება ფორმულით

$$Fr_c = \frac{\Delta\rho g H}{\rho_0 u_c^2}, \quad (9)$$

სადაც განმარტებული სიდიდეების გარდა  $\Delta\rho$  არის სიმკვრივეთა სხვაობა გარე ჰაერსა და კვამლს შორის, კგ/მ<sup>3</sup>.

კვამლის საშუალო ტემპერატურა გამოითვლება ფორმულით

$$T = T_0 + \frac{\dot{Q}_c}{\rho_0 c_p A u_c}, \quad (10)$$

სადაც განმარტებული სიდიდეების გარდა  $T_0$  არის გარე ჰაერის ტემპერატურა, K.

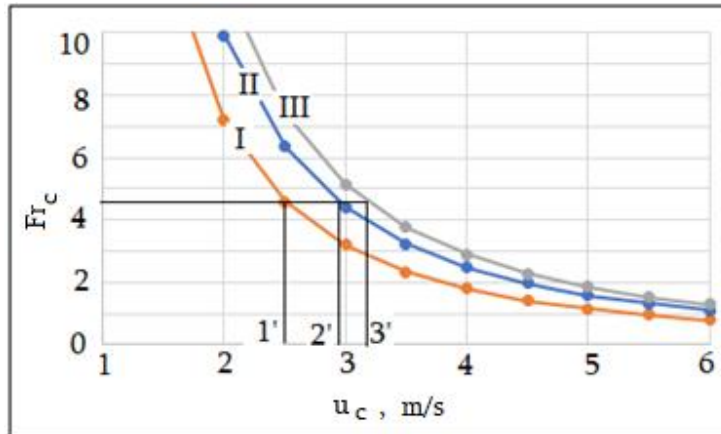
აღსანიშნავია, რომ კრიტიკული სიჩქარის განსაზღვრისათვის ფორმულით (7), საჭიროა კვამლის საშუალო ტემპერატურისა და პროპორციულობის მუდმივას ცოდნა, ხოლო მათი საანგარიშო ფორმულები (8)-(10) შეიცავენ საძიებელ სიდიდეს  $u_c$ -ს. აღნიშნულის დასაძლევად შემოიტანეს 4.5-ის ტოლი ფრუდის კრიტიკული რიცხვი, რაც ამარტივებს გაანგარიშებას. როგორც ქვემოთ დავინახავთ, აღნიშნული არ არის პრობლემის გადაჭრის გზა.

უკუდინების კრიტიკული სიჩქარე ფრუდის კრიტერიუმს პირველად დაუკავშირა თომასმა [21], აღნიშნა რა, რომ წვის პროდუქტებისა და ჰაერის ნარევის დინების ხასიათი დამოკიდებულია კვამლის ტივტივადობისა და სავენტულაციო ჭავლის ინერციული ძალების ფარდობაზე, რომელიც გამოხატულია ფრუდის კრიტერიუმით და მცირე მასშტაბის სპირტის ალის მიხედვით შემოიტანა კრიტერიუმის კრიტიკული რიცხვითი სიდიდე  $Fr_c = 1$ .

ლისა და სხვების ნაშრომში [22] შესწავლილი იყო  $0,3 \times 0,3 \times 10$  მ ზომების შემის ხერგილისაგან გამონვეული ხანძარი აეროდინამიკურ მილში და აღნიშნული იყო, რომ ხანძრის კერაზე აეროდინამიკური წინაღობა 6-ჯერ მატულობდა სავენტულაციო ნაკადისათვის, ხოლო ხანძრის მიღმა ორივე მხარეზე - დაახლოებით 1,5-ჯერ. უკუდინება შეიმჩნეოდა, როცა ხანძრის კერაზე დროსელირებული სავენტულაციო ნაკადის სიჩქარე შეადგენდა 0,6 მ/წმ-ს, რაც შეესაბამებოდა ფრუდის კრიტერიუმის რიცხვით სიდიდეს  $Fr_c \approx 7$ .

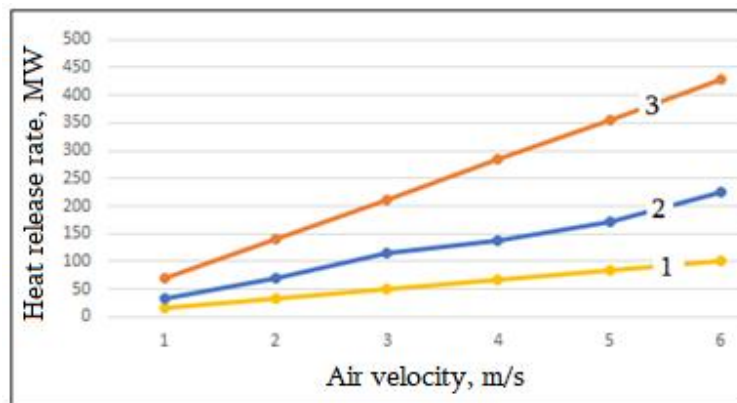
დანზიგერმა და კენედიმ [23], ისე, რომ არ შეუსწავლიათ პროცესები სათანადო სიღრმით, რეინოლდის რიცხვის მსგავსად ელოდნენ რა, რომ ფრუდის კრიტერიუმსაც ექნებოდა კრიტიკული რიცხვითი სიდიდე, კრიტიკული რიცხვითი მნიშვნელობა 4.5 შემოიტანეს თითქოსდა ლისა და სხვების მითითებული ნაშრომის მიხედვით, რომელიც მრავალი ავტორის მიერ განხილვის საგანი იყო წლების განმავლობაში კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების მანძილთან დაკავშირებით. ანალოგიურია კენედის მოხსენება „კრიტიკული სიჩქარე: წარსული, აწმყო და მომავალი“, რომელიც მან გააკეთა 1996 წელს ლონდონში სემინარზე „კვამლი და კრიტიკული სიჩქარე გვირაბებში“ [24].

აღნიშნული დაშვება საკითხს ამარტივებს, რადგან ამ შემთხვევაში ფორმულა (7)-ის მიხედვით კოეფიციენტი  $k = 0.606$ , მაგრამ არ არის მართებული.



ნახ. 12. ფრუდის კრიტიკული რიცხვის ცვალებადობა კრიტიკული სიჩქარის მიხედვით, როცა გვირაბის სიმაღლე არის 6 მ; გვირაბის განივი კვეთის ფართობი 50 მ<sup>2</sup>; გარე ჰაერის ტემპერატურა 293 K ; კვამლის საშუალო ტემპერატურების შესაბამისად: I – 573; II – 903; III – 1373 K

ნახაზიდან 12 ჩანს, რომ კრიტიკული სიჩქარის რიცხვითი სიდიდე იცვლება 2.5-3.2 მ/წმ-ის ფარგლებში, იმ პირობით, თუ  $Fr_c = 4.5$ . ამგვარად, კრიტიკული სიჩქარის მაქსიმალური სიდიდე შეადგენს 3.2 მ/წმ და პრობლემა არ არსებობს, მაგრამ სინამდვილეში კრიტიკული სიჩქარის ცვალებადობის დიაპაზონი უფრო ფართოა (იხ. ნახ. 13) და შესაბამისად, ფრუდის კრიტიკული რიცხვი არ არის მუდმივი სიდიდე.



ნახ. 13. ვენტილაციით კონტროლირებადი ხანძრის სიმძლავრის ცვალებადობა ჰაერის სიჩქარის მიხედვით, როცა გვირაბის სიმაღლე არის 6 მ; გვირაბის განივი კვეთის ფართობი 50 მ<sup>2</sup>; გარე ჰაერის ტემპერატურა 293 K ; კვამლის საშუალო ტემპერატურების შესაბამისად: I – 573; II – 903; III – 1373 K

აღნიშნულიდან ცხადია, რომ მიუხედავად მთელი რიგი უპირატესობებისა ხანძრების ფიზიკური მოდელირებისას, ფრუდის კრიტერიუმის გამოყენების სასარგებლოდ, მისი გამოყენება შედეგების განზოგადებისა და კორელაციისათვის უარყოფითად უნდა შევაფასოთ,

რადგან ამ დროს იკარგება სიზუსტე უბან-უბან მუდმივი ფუნქციების გამოყენების შემთხვევაშიც კი. ამასთან ერთად აღსანიშნავია, რომ ძლიერი ხანძრების შემთხვევაშიც კი ადგილი აქვს ნახაზებზე 12 და 13 მოცემულ შეუსაბამობებს ფრუდის კრიტერიუმისათვის, ხოლო მცირე სიმძლავრის ხანძრების პირობებში, ფრუდის კრიტერიუმით სარგებლობა შედეგების კორელაციისათვის ნაკლები სიზუსტის გამო უნდა გამოირიცხოს. ფრუდის რიცხვის კრიტიკული მაჩვენებელი 4.5 არ შეესაბამება რეალურად მიმდინარე ძლიერ ხანძრებს და გამოვთქვამთ ფრთხილ ვარაუდს იმასთან დაკავშირებით, რომ შესაძლებელია თვით ფრუდის კრიტერიუმის კრიტიკული მაჩვენებლის შესახებ ცნებაც მოკლებული იყოს ფიზიკურ შინაარსს რეალურად მიმდინარე ძლიერი ხანძრებისათვის.

### 3. დასკვნა

- წარმოდგენილი შედეგების მიხედვით შესაძლებელია დავასკვნათ, რომ გვირაბის ფიზიკური მოდელი მოსახერხებელია ექსპერიმენტების ჩასატარებლად, რადგან ფრუდის კრიტერიუმის გამოყენება საშუალებას იძლევა ძლიერი ხანძრების სცენარები შესწავლილი იქნეს მცირე სიმძლავრის ხანძრით, რაც ექსპერიმენტებს აიაფებს უსაფრთხოების შემცირების გარეშე.
- ფიზიკური მოდელირების გზით შესაძლებელია მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური მაჩვენებლები: ჰაერის ნაკადის კრიტიკული სიჩქარისა და უკუდინების სიგრძის განსაზღვრა, მათი სიდიდეების კორელაცია გვირაბის დახრილობის, ტრანსპორტით გვირაბის შევსების კოეფიციენტის, ხანძრის სიმძლავრისა და სხვა მნიშვნელოვანი დამახასიათებელი პარამეტრების მიხედვით, რაც აგრეთვე გვაძლევს რიცხვითი ამოცანების ვალიდაციის შესაძლებლობას.

მიძღვნა:

წინამდებარე ნაშრომი მომზადებულია შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით. გრანტის ნომერი: AR-19-1936, დასახელება: „ტრანსფორმირებადი სისტემების დამუშავება და გამოცდა საავტომობილო გვირაბში სიციხის გადასარჩენად ხანძრის პირობებში“.

ლიტერატურა:

- [1] A. Beard, R. Carvel (2012) Handbook of Tunnel Fire Safety, *Second edition*, Thomas Telford Limited, p. 678.
- [2] D. Theologitis (2005) Euro transport, # 3. pp. 16 – 22.
- [3] UN, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe (2001) *Report TRANS/AC.7/9*. p. 59.
- [4] UN, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe (2002) *Report TRANS/AC.7/11*. p. 6.

- [5] O. Lanchava (2019) ANALYSIS OF CRITICAL AIR VELOCITY FOR TUNNEL FIRES CONTROLLED BY VENTILATION. *Mining Journal NI (42)*, pp. 126-132, Tbilisi (in Georgian).
- [6] Y.Z. Li., H. Ingason (2018) Discussions on critical velocity and critical Froude number for smoke control in tunnels with longitudinal ventilation. *Fire Safety Journal*, Vol. 99, pp. 22-26.
- [7] O. Lanchava, E. Medzmariashvili, N. Ilias, G. Khitalishvili, Z. Lebanidze (2009) Prospects of usage of transformable systems for extinguishing fire in tunnels. International Scientific Conference “Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas”, Tbilisi, pp. 301-308.
- [8] O. Lanchava, G. Nozadze, N. Bochorishvili, Z. Lebanidze, N. Arudashvili, M. Jangidze, K. Tsikarishvili (2014) Criteria for evaluation of emergency firefighting in transport tunnels. “Transport Bridge Europe-Asia”, Materials of International Conference, Tbilisi, pp. 29-35.
- [9] O. Lanchava, G. Nozadze, N. Arudashvili (2015) ANALYZE OF FATAL FIRES IN TRANSPORT TUNNELS AND MEASURES OF ITS PREVENTING. *Mining Journal N2 (35)*, pp. 85-89, Tbilisi (in Georgian).
- [10] O. Lanchava, G. Nozadze, N. Arudashvili (2016) THE NATURAL AERODYNAMIC OBSERVATION RESULTS OF THE CHAKVI-MAKHINJAURI ROAD TUNNELS. *Mining Journal NI (36)*, pp. 61-63, Tbilisi (in Georgian).
- [11] O. Lanchava, N. Ilias, G. Nozadze (Jan 2017) Some problems for assessment of fire in road tunnels. *Quality Access to Success*, Vol. 18, S1, pp. 69-72.
- [12] N. Ilias, O. Lanchava, G. Nozadze (Jan 2017) Numerical modelling of fires in road tunnels with longitudinal ventilation system. *Quality Access to Success*, Vol. 18, S1, pp. 77-80.
- [13] O. Lanchava, G. Abashidze, D. Tsverava (Jan 2017) Securing fire safety for underground structures. *Quality Access to Success*, Vol. 18, S1, pp. 47-50.
- [14] J. Lia, Y.F. Li, C.H. Cheng, W.K. Chow (2019) A study on the effects of the slope on the critical velocity for longitudinal ventilation in tilted tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, 89, pp. 262-265.
- [15] A. Vaitkevicius, R. Carvel (2016) Investigating the Throttling Effect in Tunnel Fires. *Fire Technology*, Vol. 52, pp. 1619–1628.
- [16] O. Lanchava, N. Ilias, G. Nozadze, S.M. Radu, R.I. Moraru, Z. Khokerashvili, N. Arudashvili (2017) The impact of the piston effect on the technological characteristics of ventilation in the subway tunnels. *Proceedings of 8th International Symposium “Occupational Health and Safety” SESAM 2017*, Bucharest, pp. 342-352.
- [17] O. Lanchava, N. Ilias, G. Nozadze, S.M. Radu (Jan 2019) Heat and hygroscopic mass exchange modeling for safety management in tunnels of metro. *Quality Access to Success*, Vol. 20, S1, pp. 27-33.
- [18] O. Lanchava, N. Ilias, G. Nozadze, S.M. Radu, R.I. Moraru, Z. Khokerashvili, N. Arudashvili (2019) FDS MODELLING OF THE PISTON EFFECT IN SUBWAY TUNNELS. *Environmental Engineering and Management Journal*. Vol. 18, No. 4, pp. 317-325.
- [19] Y.Z. Li, B. Lei, H. Ingason (2010) *Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires*. *Fire Safety Journal*, Vol. 45, pp. 361-370.

- [20] NFPA 502 (2011) Standards for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. *National Fire Protection Association (NFPA)*.
- [21] P.H. Thomas (1968) The Movement of Smoke in Horizontal Passages against an Air Flow. *Fire Research Station*. Boreham Wood, p. 8.
- [22] C.K. Lee, R.F. Chaiken, J.M. Singer (1979) Interaction between duct fires and ventilation flow: an experimental study. *Combustion Science and Technology*. Vol. 20, pp. 59-72.
- [23] N.H. Danziger, W.D. Kennedy (1982) Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels. *Fourth International Symposium on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, BHRA Fluid Engineering*. 1982, pp. 169-186.
- [24] W.D. Kennedy (1996) Critical velocity: past, present and future. *Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels, JFL Lowndes*, pp. 305–322.
- [25] H. Wan, Z. Gao, J. Han, ... Y. Zhang (2019) A numerical study on smoke back-layering length and inlet air velocity of fires in an inclined tunnel under natural ventilation with a vertical shaft. *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 138, pp. 293-303.
- [26] O. Lanchava, N. Ilias (2020) Calculation of railway tunnels ventilation. *Journal of Engineering Sciences and Innovation*, Volume 5, Issue 1 / 2020, pp. 69-86.