

საქართველოს სივრცითი განვითარების პოლიტიკა:
დარგობრივი
პრობლემები და პერსპექტივები

ავტორი ომარ ლანჩავა

DOI: <https://doi.org/10.52340/monog2025.12.11>

თბილისი
2025

- საქართველოს სივრცული განვითარების პოლიტიკა
- პროფესიული უსაფრთხოების სისტემური ანალიზი
- სატრანსპორტო ინფრასტრუქტურის რისკების შეფასება
- ინტეგრირებული კვლევა

წინამდებარე კვლევა ხელს უწყობს საქართველოს სივრცითი განვითარების პოლიტიკას შრომის უსაფრთხოების უნივერსალურ ანალიტიკურ მოდელებზე დაფუძნებული რეკომენდაციების მეშვეობით. იგი წარმოადგენს მულტიდისციპლინურ ჩარჩოს საგზაო გვირაბის ხანძრის პირობებში პროფესიული უსაფრთხოების შესაფასებლად. CFD მოდელირების, MATLAB-ზე დაფუძნებული ევაკუაციის ანალიზისა და სტრატეგიული რისკის ინდექსების (LRI, IDI, EEI) ინტეგრირებით, ის სიცოცხლის რისკის, ინფრასტრუქტურის დაზიანებისა და ეკონომიკური ზემოქმედების რაოდენობრივი შეფასების საშუალებას იძლევა. ეფექტურობის კოეფიციენტის შემოღება ზრდის ASET მოდელირების სიზუსტეს, რაც ასახავს ვენტილაციის სისტემის რეაგირებას. სცენარებზე დაფუძნებული მოდელირება აჩვენებს, რომ ტრანსფორმირებადი ვენტილაციის სისტემები მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს სიცოცხლის გადარჩენას უსაფრთხო ევაკუაციის დროის შუალედების გაზრდით. მეთოდოლოგია შეესაბამება NFPA, ISO და PIARC სტანდარტებს და მხარს უჭერს

**სტრატეგიული გადაწყვეტილების მიღებას გვირავს უსაფრთხოების
მართვაში.**

სარჩევი	
აბსტრაქტი	5
Abstract	6
წინასიტყვაობა	7
შესავალი	8
1. სატრანსპორტო გვირაბების უსაფრთხოება	10
1.1. საკითხის მოკლე მიმოხილვა	10
1.2. დაგეგმილი პროექტის აქტუალურობა	13
1.3. დასახული მიზნის მიღწევის სამუშაო ჰიპოთეზა	14
1.4. მრავალფაქტორიანი დინამიკური მოდელის შესახებ	14
1.5. საგვირაბე ვენტილაციონებისა და ხანძრის ურთიერთმოქმედება	16
1.6. ფრუდის რიცხვი (<i>Fr</i>)	19
1.7. ფრუდის რიცხვის შეზღუდულობა	21
1.8. სახანძრო უსაფრთხოების ინტეგრირებული მოდელირება	21
1.9. შემაჯამებელი მოსაზრებები	23
1.10. დანართი	26
2. ხანძრის პირობებში პროფესიული უსაფრთხოების შეფასება	27
2.1. წინასწარი შენიშვნები	27
2.2. ძირითადი ცნებები	28
2.3. პროფესიულ უსაფრთხოებაში გამოყენებული კვლევის მეთოდები	29
2.4. რაოდენობრივი მეთოდები	30
2.5. ხარისხობრივი მეთოდები	30
2.6. შერეული მეთოდები	31
2.7. მეთოდოლოგიური რუკა	31
2.8. პროფესიული უსაფრთხოების კვლევის მეთოდები	32
2.9. უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსი	33
2.10. გავლენის ერთიანი ინდექსი	36
2.11. რისკებზე დაფუძნებული აზროვნება	39
2.12. ISO 31000 — რისკების მართვის სტანდარტი	40

2.13.	ISO 45001 — შრომის უსაფრთხოება და ჯანმრთელობა	40
2.14.	რისკზე დაფუძნებული აზროვნება პრაქტიკაში	41
2.15.	ტექნოლოგიური პროცესები და რისკის მართვა ჯანდაცვაში	41
2.16.	რისკის მართვის ინტეგრირებული მოდელი	41
2.17.	შემაჯამებელი დასკვნა	42
3.	უსაფრთხოება საავტომობილო გვირაბის ხანძრის პირობებში	43
3.1.	მეთოდოლოგიური ჩარჩო და მისი აუცილებლობა	43
3.2.	საავტომობილო გვირაბის ხანძრის სცენარი	45
3.3.	შესასრულებელი ანალიზის ეტაპები	48
3.4.	ASET-ის დინამიკა ვენტილაციის სტრატეგიების მიხედვით	49
3.5.	ASET და RSET დინამიკა	51
3.6.	ASET და RSET გამოყენების კონტექსტი	54
3.7.	ეფექტურობის კოეფიციენტი $\mathcal{F}$	55
3.8.	რეკომენდაციების დამუშავება	56
3.9.	დასკვნითი შენიშვნები	57
3.10.	დანართი	59
3.11.	ლიტერატურა	66

აბსტრაქტი

წინამდებარე ინტეგრირებული კვლევა აერთიანებს ოთხ დოკუმენტურ საფუძველს, რათა ჩამოყალიბდეს მტკიცებულებაზე დაფუძნებული ჩარჩო, რომელიც ემსახურება საქართველოს სივრცითი განვითარების პოლიტიკის მიზნებს. კვლევის ფოკუსია პროფესიული უსაფრთხოების სისტემური ანალიზი, სატრანსპორტო ინფრასტრუქტურის რისკების შეფასება და მათი ინტეგრაცია ეროვნულ სივრცით სტრატეგიაში.

პირველ ეტაპზე განიხილება საქართველოს სივრცის დაგეგმარების გეგმის კონცეფცია (NSDC), რომელიც წარმოადგენს ქვეყნის ტერიტორიული განვითარების გრძელვადიან ჩარჩოს. იგი ეფუძნება „ხედვა 2030“-ის პრიორიტეტებს: მდგრადი ეკონომიკური განვითარება, რეგიონული თანასწორობა, კლიმატის მედეგობა და ევროპულ სტანდარტებთან ინტეგრაცია. ამ მიზნების მიღწევა მოითხოვს კრიტიკული ინფრასტრუქტურის, მათ შორის სატრანსპორტო გვირაბების უსაფრთხოების სისტემურ შეფასებას და რისკების მართვის უნივერსალურ მოდელს.

მეორე ეტაპზე წარმოდგენილია სატრანსპორტო გვირაბების უსაფრთხოების ანალიზი აბრეშუმის გზის ისტორიული და თანამედროვე კონტექსტში. საქართველო, როგორც ახალი აბრეშუმის გზის ტრანზიტური ქვეყანა, მოითხოვს ინფრასტრუქტურული მდგრადობის უზრუნველყოფას. კვლევა მოიცავს ვენტილაციის სისტემების, უსაფრთხოების ზონების, სენსორული დეტექციისა და ევაკუაციის მექანიზმების შეფასებას, აგრეთვე GIS რუკებს, ციფრულ ტექნოლოგიასა და BCR მეთოდით ფინანსურ ანალიზს. ეს ქმნის სივრცით პოლიტიკაზე მორგებულ გადაწყვეტილების მხარდაჭერის სისტემას.

მესამე ეტაპზე წარმოდგენილია საავტომობილო გვირაბის ხანძრის მოდელირება, როგორც ტექნიკური და ინტერდისციპლინარული ანალიზის მაგალითი. CFD სიმულაციები, MATLAB კოდირება, RSET/ASET ანალიზი და სტრატეგიული ინდექსები (LRI, IDI, EEI) ქმნის ტექნიკურ საფუძველს, რომელიც საშუალებას იძლევა სიცოცხლის რისკის, ინფრასტრუქტურის დაზიანებისა და ეკონომიკური ზემოქმედების რაოდენობრივი შეფასება. კვლევა ეფუძნება საერთაშორისო სტანდარტებს (NFPA, ISO, PIARC) და ადაპტირებულია საქართველოს სატრანსპორტო რეალობაზე. განხილულია პროფესიული უსაფრთხოების კვლევის მეთოდოლოგიური ჩარჩო, რომელიც ეფუძნება რაოდენობრივ, ხარისხობრივ და შერეულ მიდგომებს. ეს ჩარჩო ადაპტირებადია დარგობრივი სპეციფიკის მიუხედავად და უზრუნველყოფს ტრიანგულაციურ ანალიზს —

დაკვირვება, ინტერვიუები, სტატისტიკა — რაც ზრდის კვლევის სანდოობას. წარმოდგენილია რისკების ტიპოლოგია, მეთოდოლოგიური რუკა და უსაფრთხოების სპეციალისტის კომპეტენციების სტრუქტურა.

საბოლოოდ, ნაშრომი ქმნის ინტერდისციპლინარულ, მტკიცებულებაზე დაფუძნებულ ჩარჩოს, რომელიც პირდაპირ ემსახურება NSDC-ის მიზნებს. ისინი აერთიანებენ სტრატეგიულ ხედვას, ტექნიკურ ანალიზს და უნივერსალურ მეთოდოლოგიას, რაც აუცილებელია ისეთი კომპლექსური სისტემების მართვისთვის, როგორიცაა სატრანსპორტო ინფრასტრუქტურა. ამ ინტეგრირებული მიდგომის გარეშე, საქართველოს სივრცითი განვითარების პოლიტიკა ვერ მიაღწევს სრულფასოვან ეფექტიანობას — იქნება ეს სიცოცხლის დაცვა, ინვესტიციების მიზნობრივი განაწილება, თუ რეგიონული თანასწორობის უზრუნველყოფა.

Abstract [Spatial Development Policy of Georgia: Sectoral Problems and Prospects]

This integrated study presents a multidisciplinary framework that aligns professional safety research, critical infrastructure resilience, and national spatial development policy in Georgia. Drawing on four complementary documents — the National Spatial Development Concept (NSDC), a technical analysis of road tunnel fire safety, a simulation-based case study using CFD and MATLAB modeling, and a methodological review of universal safety research approaches — the paper constructs a unified evidence-based foundation for spatially informed risk governance.

Georgia's NSDC outlines a long-term vision for balanced territorial development, emphasizing regional equity, climate resilience, and alignment with European standards. Achieving these goals requires embedding safety and risk assessment into the spatial planning process, particularly in relation to critical infrastructure such as road tunnels. The second layer of this study explores tunnel safety within the historical and contemporary context of the Silk Road, positioning Georgia as a strategic transit corridor in the Belt and Road Initiative. Here, infrastructure resilience — defined as the capacity to absorb, adapt, and recover from stressors — becomes a national imperative.

The third component applies advanced modeling techniques to a real-world tunnel scenario, integrating CFD-based smoke propagation analysis, agent-based evacuation simulations, and strategic risk indices (LRI, IDI, EEI). These tools quantify life safety, infrastructure damage, and economic impact, offering actionable insights for tunnel design, ventilation strategies, and emergency response planning. The final layer synthesizes universal research methodologies in occupational safety — including quantitative, qualitative, and mixed methods — and demonstrates their adaptability across sectors, from mining and healthcare to transport infrastructure.

Together, these components form a coherent, scalable model for integrating professional safety into spatial development. The findings underscore the necessity of interdisciplinary, data-driven approaches to infrastructure planning, where safety is not an afterthought but a foundational criterion. By embedding resilience metrics, GIS-based risk mapping, and digital twin technologies into national planning, Georgia can enhance both the security of its transit systems and the credibility of its spatial governance. This synthesis affirms that without such integration, spatial

policy remains incomplete — and that professional safety research is not peripheral, but central to sustainable territorial development.

წინასიტყვაობა

საქართველოს სატრანსპორტო ინფრასტრუქტურის უსაფრთხო ექსპლუატაცია, განსაკუთრებით გვირაბების შემთხვევაში, წარმოადგენს კრიტიკულ კომპონენტს ეროვნული სივრცითი განვითარების სტრატეგიისთვის. როგორც აღნიშნულია „საქართველოს სივრცის დაგეგმარების გეგმის კონცეფციის“^[1] დოკუმენტის შესავალ ნაწილში (გვ. 2–4), ქვეყნის გეოპოლიტიკური მდებარეობა და ტრანზიტული პოტენციალი განაპირობებს ინფრასტრუქტურის სტრუქტურულ ტრანსფორმაციას, რაც თავის მხრივ მოითხოვს უსაფრთხოების, მდგრადობისა და სიცოცხლისუნარიანობის სისტემურ უზრუნველყოფას.

დოკუმენტის „ხედვა, სტრატეგია და სიცოცხლისუნარიანობა“ ნაწილში (ეტაპი 2, გვ. 25–26) ხაზგასმულია, რომ სივრცითი დაგეგმარება უნდა ემსახურობდეს ტრანსფორმაციული სტრატეგიის ფორმულირებას, ინოვაციური ქმედებების მხარდაჭერას და კლიმატის ცვლილებასთან დაკავშირებული რისკების მართვას. ამ კონტექსტში, სატრანსპორტო გვირაბების სავენტილაციო სისტემების კოლაფსის რისკების ანალიზი და ევაკუაციის სტრატეგიების მოდელირება წარმოადგენს არა მხოლოდ ტექნიკურ, არამედ სტრატეგიულ ამოცანას, რომელიც უნდა ინტეგრირდეს სივრცით სტრუქტურაში.

დოკუმენტის „სამუშაოს მოცულობა და ამოცანები“ ნაწილში (გვ. 12–14) მითითებულია, რომ კონცეფცია უნდა მოიცავდეს ტრანსპორტისა და საინჟინრო ინფრასტრუქტურის შეფასებას, მათ შორის — უსაფრთხოების, მდგრადობისა და სიცოცხლისუნარიანობის პარამეტრების გათვალისწინებით. შესაბამისად, გვირაბებში ხანძრის პირობებში სავენტილაციო სისტემების რეაგირების მოდელირება და მათი ტრანსფორმირებადობა წარმოადგენს იმპერატიულ კომპონენტს, რომელიც უნდა აისახოს როგორც სივრცით დაგეგმარებაში, ისე სახელმწიფო ინვესტიციების პლატფორმაში (შედეგი 2, გვ. 34).

გარდა ამისა, კონცეფციის „ზოგადი მიმოხილვის“ ნაწილში (გვ. 4–8) ხაზგასმულია, რომ საქართველოს სივრცითი დაგეგმარება უნდა ემსახურობდეს რეგიონულ ინტეგრაციას, ეკონომიკური ჰაბის ფორმირებას და კლიმატისადმი მედეგი

ინფრასტრუქტურის განვითარებას. სატრანსპორტო გვირაბები — განსაკუთრებით რიკოთის უღელტეხილისა და ჩაქვი-მახინჯაურის მონაკვეთზე — აკავშირებენ ქვეყნის ეკონომიკურ რეგიონებს და საერთაშორისო სატრანზიტო არტერიებს, რაც მათ სტრატეგიულ მნიშვნელობას კიდევ უფრო აძლიერებს.

ამგვარად, წარმოდგენილი კვლევა გვირაბების სავენტილაციო სისტემების კრიტიკული სიჩქარის, უკუდინების და კოლაფსის მოდელირების შესახებ, წარმოადგენს იმ ტექნიკურ საფუძველს, რომელიც უნდა ინტეგრირდეს საქართველოს სივრცის დაგეგმარების კონცეფციაში. ეს ინტეგრაცია უზრუნველყოფს:

- სიცოცხლის გადარჩენის სტრატეგიების სივრცით ანალიზს.
- საგანგებო სიტუაციების მართვის მოდელების გათვალისწინებას.
- ტრანსფორმირებადი ტექნოლოგიების დანერგვის შესაძლებლობას.
- ეროვნული და რეგიონული უსაფრთხოების პარამეტრების გაძლიერებას.

აღნიშნული მიდგომა სრულად შეესაბამება „ხედვა 2030“-ის პრიორიტეტებს (დანართი #1, გვ. 47), მათ შორის — მდგრადი ეკონომიკური განვითარება, ეკოლოგიურად სუფთა გარემო, რეგიონული უთანასწორობის შემცირება და ინფრასტრუქტურის ტრანსფორმაცია. შესაბამისად, გვირაბების უსაფრთხოების საკითხის ინტეგრაცია სივრცით სტრატეგიაში წარმოადგენს არა მხოლოდ ტექნიკურ, არამედ პოლიტიკურ და სოციალურ აუცილებლობას.

შესავალი

საქართველოს მთავრობამ, „ხედვა 2030“-ის სტრატეგიის ფარგლებში, წამოაყენა სივრცის დაგეგმარების გეგმის კონცეფცია (NSDC) [1], რომელიც მიზნად ისახავს დარგობრივი სტრატეგიების კოორდინაციას, რეგიონული უთანასწორობის შემცირებას და გრძელვადიანი სახელმწიფო ინვესტიციების მიზნობრივ განაწილებას. ამ მიზნების მიღწევა შეუძლებელია პროფესიული უსაფრთხოების სისტემური ანალიზისა და კრიტიკული ინფრასტრუქტურის რისკების შეფასების გარეშე.

წინამდებარე კვლევა აერთიანებს ოთხ დოკუმენტურ საფუძველს: (1) NSDC-ის ტექნიკურ დავალებას, (2) სატრანსპორტო გვირაბების უსაფრთხოების ანალიზს აბრეშუმის გზის კონტექსტში, (3) საავტომობილო გვირაბის ხანძრის მოდელირებას CFD და MATLAB-ის გამოყენებით, და (4) პროფესიული უსაფრთხოების კვლევის მეთოდოლოგიურ ჩარჩოს. ეს ინტეგრირებული მიდგომა ქმნის მტკიცებულებაზე დაფუძნებულ ჩარჩოს, რომელიც ემსახურება როგორც სიცოცხლის დაცვას, ისე სივრცით სტრატეგიასთან შესაბამისობას.

საქართველო საუკუნეების მანძილზე წარმოადგენდა სტრატეგიულ ქვეყანას, რომელიც აკავშირებდა ჩინეთს ევროპასთან — აბრეშუმის გზის ისტორიული მარშრუტის გავლით. თანამედროვე სივრცითი დაგეგმარების კონცეფცია (NSDC) აღიარებს საქართველოს როგორც რეგიონული ჰაბის პოტენციალს, რომელიც აერთიანებს გლობალურ ეკონომიკურ ტენდენციებსა და სატრანზიტო დერეფნებს (NSDC, გვ. 4, 25). ამ კონტექსტში, სატრანსპორტო გვირაბები წარმოადგენს არა მხოლოდ ინფრასტრუქტურულ ელემენტს, არამედ სივრცითი ინტეგრაციის ბირთვს, რომელიც აძლიერებს ქვეყნის გეოეკონომიკურ როლს. თანამედროვე ინფრასტრუქტურა, მათ

შორის სატრანსპორტო გვირაბები, წარმოადგენს ამ მარშრუტის ლოგიკურ გაგრძელებას. სატრანსპორტო გვირაბების უსაფრთხოება და მათი ინტეგრაცია ქვეყნის სივრცულ განვითარებაში არის კრიტიკული საკითხი, რომელიც უზრუნველყოფს მოსახლეობის უსაფრთხოებას, ეკონომიკურ მდგრადობას და საერთაშორისო ტრანზიტის სტაბილურობას.

სხვა ქვეყნების ანალოგიურად, საქართველოს ეკონომიკის მდგრადობაც დიდადაა დამოკიდებული სატრანსპორტო სისტემის გამართულ მუშაობაზე. ამ სისტემაში გვირაბი საკვანძო ელემენტია, რადგან გზის ყველაზე უფრო რთული მონაკვეთის გადალახვა მისი მეშვეობით ხდება და სწრაფდება ტვირთბრუნვა. გვირაბი ზოგადად და განსაკუთრებით მაღალი გამტარებლობის პირობებში, იმავდროულად პრობლემური ელემენტიცაა, რადგან მასში მოსალოდნელია ხანძრის გაჩენა. გვირაბში ხანძარი ხასიათდება ძლიერი დამანგრეველი მოქმედებით და ამის გამო ხანგრძლივ უარყოფით გავლენას მოახდენს გვირაბის ნორმალურ ფუნქციონირებაზე. NSDC-ის მიხედვით, ინფრასტრუქტურის სიცოცხლისუნარიანობა და საგანგებო სიტუაციებზე რეაგირების უნარი განიხილება როგორც სივრცითი მდგრადობის ძირითადი კომპონენტი (გვ. 26). შესაბამისად, გვირაბის ფუნქციური მდგრადობა უნდა შეფასდეს არა მხოლოდ საინჟინრო, არამედ სივრცითი უსაფრთხოების ჭრილში.

გვირაბების ფუნქციონირების ხანგრძლივი პერიოდით მოშლა გამოიწვევს პირდაპირ ზარალს, შეაფერხებს ეკონომიკის განვითარებას და ქვეყანას უმძიმეს მდგომარეობაში ჩააყენებს.

ამის გამო გვირაბის უსაფრთხო ვენტილაციასთან დაკავშირებული საკითხების ახალი გადაწყვეტების შემოტანა მნიშვნელოვანია. აღნიშნულ გადაწყვეტებში გაანალიზებული უნდა იქნეს მსოფლიოს გვირაბებში მომხდარი რეზონანსული ხანძრების მიზეზები და შედეგები. უფრო რეალისტურად უნდა იქნეს შეფასებული სავენტილაციო სისტემის შესაძლებლობები. განხილული უნდა იქნეს ვენტილაციის სისტემის მოსალოდნელი კოლაფსი და მავნე გავლენის შესამცირებელი ღონისძიებები შესაბამისად და ადეკვატურად უნდა იქნეს დამუშავებული. ძალზე მნიშვნელოვანია შექმნილი საგანგებო სიტუაციების ეფექტური მართვისათვის, ისე როგორც კოლაფსის მავნე გავლენის შემცირებისათვის საჭირო დროს ტრანსფორმირებადი ელემენტების ჩართვა სავენტილაციო სისტემაში. აქედან გამომდინარე, რიკოტის უღელტეხილის 50-მდე ახალი გვირაბისა და ჩაქვი-მახინჯაურის საავტომობილო გვირაბებში შესაძლებელი იქნება სიცოცხლის უფრო საიმედოდ გადარჩენა, აგრეთვე შესაძლებელი იქნება გვირაბების ხანგრძლივი პერიოდით მყობრიდან გამოყვანის თავიდან აცილება.

გვირაბისა და მისი ინფრასტრუქტურის მწყობრიდან გამოყვანის შედეგად გამოწვეული პირდაპირი მატერიალური ზარალის შემცირებასთან ერთად, აღნიშნული აგვაცილებს ზარალს გვირაბების მოცდენისა და საერთაშორისო ტვირთების გადამისამართების გამო. NSDC-ის სახელმწიფო ინვესტიციების პლატფორმა (გვ. 34) ითვალისწინებს ისეთ პროექტებს, რომლებიც ამცირებენ ინფრასტრუქტურული შეფერხებების ეკონომიკურ ზემოქმედებას. გვირაბების უწყვეტი ფუნქციონირება უზრუნველყოფს სატრანზიტო დერეფნის სტაბილურობას და რეგიონული ეკონომიკური კავშირების შენარჩუნებას.

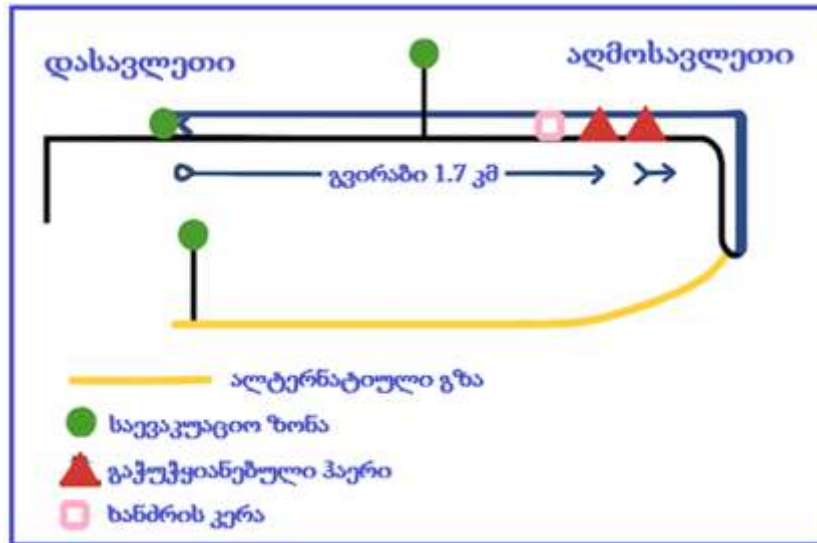
აღსანიშნავია, რომ რიკოთის გვირაბები აგებულია უძველესი დროიდან „აბრეშუმის გზის“ სახელით ცნობილი აღმოსავლეთ-დასავლეთი მიმართულების სატრანსპორტო არტერიაზე, რომლითაც ხდებოდა აბრეშუმის გადაზიდვა ჩინეთიდან დასავლეთ ევროპაში შავი ზღვის გამოყენებით ან იმ ტერიტორიის გავლით, რომელიც ახლანდელი თურქეთის შემადგენლობაში შედის და სხვა საერთაშორისო ტვირთების გადაზიდვა საპირისპირო მიმართულებით. საყურადღებოა, რომ ამ გვირაბით ახლაც ხდება საერთაშორისო ტვირთების გადაზიდვა როგორც შავ ზღვამდე, ისე თურქეთის ტერიტორიის გამოყენებით. გარდა ამისა, რიკოთის გვირაბები ერთმანეთთან აკავშირებს ქვეყნის ორ უმსხვილეს ეკონომიკურ რეგიონს - აღმოსავლეთ და დასავლეთ საქართველოს. ჩაქვი-მახინჯაურის ტყუპი გვირაბები კი, სამხრეთ-დასავლეთის მიმართულებისაა იმავე „აბრეშუმის გზაზე“ და საქართველოსა და თურქეთის გზატკეცილებს აკავშირებს ერთმანეთთან.

1. სატრანსპორტო გვირაბების უსაფრთხოება

1.1. საკითხის მოკლე მიმოხილვა

გრძივი ვენტილაციის პირობებში, რომელიც გამოიყენება საქართველოს უკლებლივ ყველა საავტომობილო გვირაბში, კრიტიკული სიჩქარე ავარიული ვენტილაციის სტრატეგიაში მიღებული იყო როგორც გადამწყვეტი ფაქტორი უკუდინების პრევენციისათვის. უკუდინება არის წვის პროდუქტების საპირისპირო გავრცელება აღმავალ სავენტილაციო ნაკადზე, ჰაერმიმწოდებელი გვირაბის იმ ნაწილში, სადაც სუფთა ჰაერი უნდა იყოს. აღნიშნულს იწვევს წვის პროდუქტების მაღალი ტემპერატურა, ამის გამო მათი ნაკლები სიმკვრივე და ცურვადობა ამომგდები ძალის ხარჯზე. ეს მეტად საშიში მოვლენაა ევაკუაციის შემთხვევაში სიცოცხლის გადარჩენის თვალსაზრისით. აღნიშნულს განსაკუთრებით გამოკვეთილად ადგილი აქვს მაშინ, თუ ჰაერის ნაკადი მოძრაობს ჰიფსომეტრიულად მაღალი ნიშნულიდან დაბალისაკენ, ხოლო ხანძრის კერა არის დაბალ ნიშნულზე.

კრიტიკული სიჩქარე კი არის უკუდინების გამომრიცხავი მინიმალური სიჩქარე, რომელიც უნდა მიენიჭოს სავენტილაციო ნაკადს. კრიტიკული სიჩქარე დამოკიდებულია ხანძრის სიმძლავრეზე, გვირაბის განივკვეთსა და დახრილობაზე. იმის გამო, რომ ხანძრით განვითარებული დინამიკური წნევა და ჭავლური ვენტილატორებით განპირობებული ანალოგიური წნევა ერთმანეთთან ალგებრულად იკრიბება, რომ არ მოხდეს გვირაბის სუფთა ჭავლიანი ნაწილის დაკვამლიანება, საჭიროა სუფთა ჰაერის ჭავლს ექნეს კრიტიკულ სიჩქარეზე უფრო მაღალი სიჩქარე. აქედან გამომდინარე, იდეის თანახმად, გრძივი სავენტილაციო სისტემის პირობებში, კრიტიკული სიჩქარის მქონე ჭავლი კვამლსა და წვის სხვა მავნე პროდუქტებს ხანძრის კერიდან მხოლოდ ერთ მხარეზე გამოდევნის, ხოლო მეორე მხარეზე სუფთა ჰაერი უნდა იყოს. აღნიშნული ილუსტრირებულია ფიგ. 1.1-ზე.



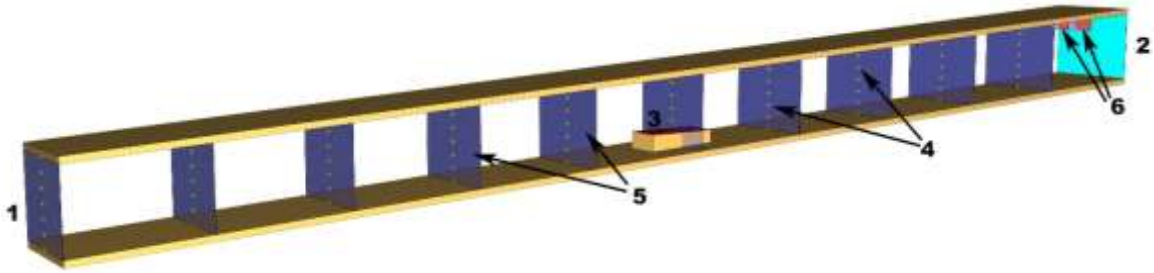
ფიგ.1.1. აღმოსავლეთ-დასავლეთის მიმართულების მარცხენა პარალელური გვირაბი

ჩვენს ნაშრომებში [2-6] კლასიკური განტოლების გამოყენებით მიღებულია, რომ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურის მქონე ხანძრის მიერ აღძრული დინამიური წნევა, გვირაბებში შეადგენს 121.6 კპა , რაც აღემატება ატმოსფერულ წნევას, ხოლო 8-ჯერ ყველაზე მძლავრი ვენტილატორების მაქსიმალურ სტატიკურ წნევას. ამ დროს ჰაერის სიმკვრივე შემცირებულია 0.277 კგ/მ^3 -მდე. შესაბამისად, ძლიერი ხანძრის შემთხვევაში პრაქტიკულად შეუძლებელი გახდება სავენტილაციო ნაკადის მართვა ვენტილატორების მეშვეობით და ჰაერის მოძრაობის მიმართულება და ხარჯი განპირობებული იქნება ხანძრის მიერ აღძრული დეპრესიით.

აღნიშნული დებულება წინააღმდეგობაში მოდის კრიტიკული სიჩქარის იდეასთან. ამიტომ ჩვენ შევასრულეთ საცდელი რიცხვითი მოდელირება 100 მ-მდე სიგრძის გვირაბისათვის. ექსპერიმენტების მიზანი იყო კრიტიკული სიჩქარის განუხრელი ზრდის დემონსტრირება ხანძრის სიმძლავრის მატების პირობებში, აგრეთვე უკუდინების თავიდან ასაცილებლად აღნიშნული ცნებაზე დაფუძნების რეალობასთან შეუსაბამობა რიცხვითი მოდელირების შედეგების შესაბამისად.

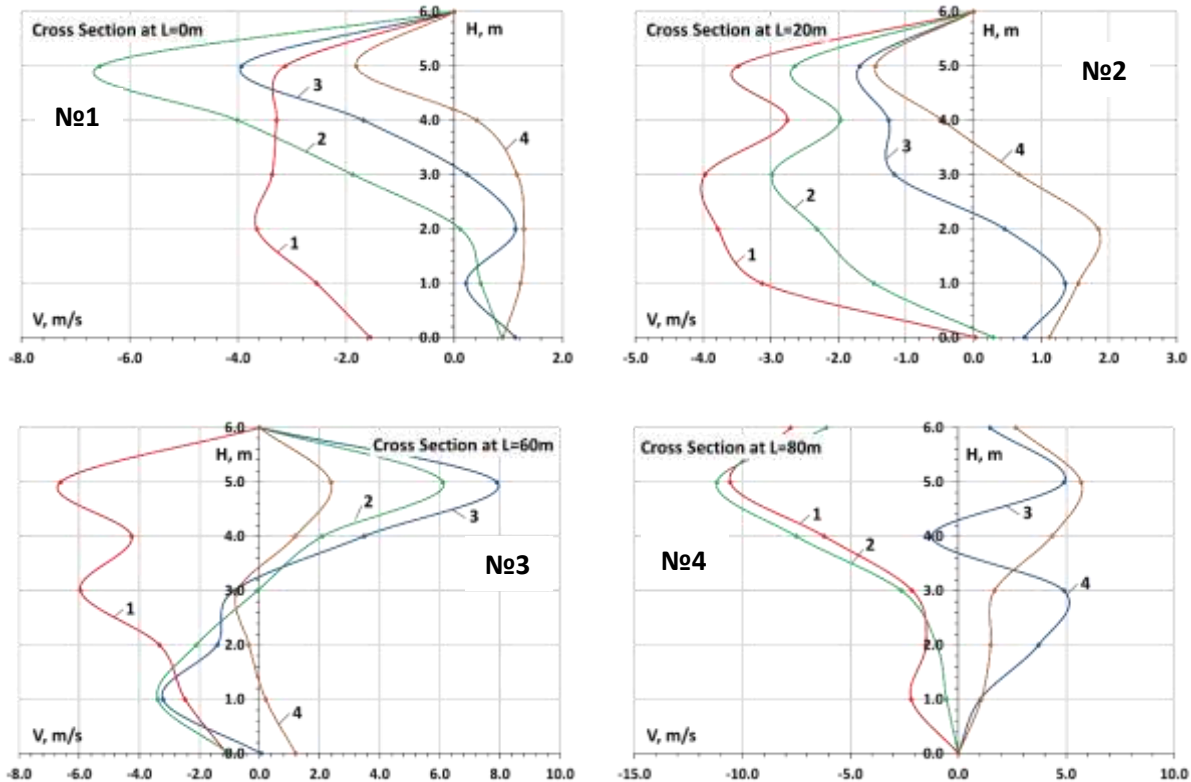
ეს წინააღმდეგობა აჩვენებს, რომ არსებული საინჟინრო პარადიგმები საჭიროებენ სივრცით კონტექსტში გადახედვას. NSDC-ის ხედვით, ტექნოლოგიური ინოვაცია და სივრცითი ინტეგრაცია უნდა იყოს თანხვედრაში, რათა შეიქმნას სიცოცხლისუნარიანი და რეაგირებადი ინფრასტრუქტურა (გვ. 25–26).

წარმოვადგენთ გვირაბში ხანძრის მოდელირების დამახასიათებელ სქემას. ხანძრის კერა განლაგებული არის გვირაბის ცენტრში. აღმავალი ნაკადის შემთხვევაში ჰაერის მიწოდება ხდება პორტალიდან 1, ხოლო გაჭუჭყიანებული ჰაერის არინება - პორტალიდან 2. დაღმავალი ნაკადისათვის პირიქით - ჰაერმიმწოდებელი არის პორტალი 2.



ფიგ. 1.2. ჭავლური ვენტილატორებისა და საზომი მოწყობილობების განლაგება გვირაბის მოდელზე: 1, 2 - ქვედა და ზედა პორტალი, სადაც დამონტაჟებულია ორი, სამი ან ოთხი ცალი ჭავლური ვენტილატორი; 3 - ხანძრის კერა; 4 - წერტილოვანი საზომი მოწყობილობები; 5 - მოცულობითი საზომი მოწყობილობები; 6 - ვენტილატორები დადმავალი სავენტილაციო ნაკადებისათვის

რიცხვითი მოდელირების შედეგად მიღებული სიჩქარის პროფილები მოცემულია ფიგ. 1.3-ზე. განივი კვეთები მოცემულია ქვედა პორტალიდან დაშორების მანძილის მიხედვით შემდეგი წესით: ნახაზი N1 - ქვედა პორტალი; ნახაზი N2 - ქვედა პორტალიდან დაშორება 20 მ; ნახაზი N3 - ქვედა პორტალიდან დაშორება 60 მ და ნახაზი N4 - ქვედა პორტალიდან დაშორება 80 მ. მრუდების ნომრები შეესაბამება დროის შუალედებს ექსპერიმენტის დაწყებიდან: 1 - $\tau = 60$ წმ; 2 - $\tau = 80$ წმ; 3 - $\tau = 100$ წმ; 4 - $\tau = 120$ წმ. სიჩქარის პროფილების ყველა ნახაზზე სიჩქარის უარყოფითი მნიშვნელობა ნიშნავს ნაკადის მოძრაობას პორტალისაკენ 1, ხოლო დადებითი მნიშვნელობა - პორტალისაკენ 2.



ფიგ. 1.3. დადმავალი სავენტილაციო ნაკადის სიჩქარის პროფილები ორი ცალი ჭავლური ვენტილატორის მუშაობის დროს, მრუდები შეესაბამებიან დროის შუალედებს: 1 - $\tau = 60$ წმ; 2 - $\tau = 80$ წმ; 3 - $\tau = 100$ წმ; 4 - $\tau = 120$ წმ

ფიგ. 1.3-ის ნახაზიდან 1, მრუდი 1 გვიჩვენებს, რომ ხანძრის ამოქმედებამდე ჰაერის ნაკადი მოძრაობს პორტალი 1-ის მიმართულებით, ხოლო სიჩქარის ეპიურას აქვს კლასიკური სახე. ამ დროს ზედა პორტალთან ერთდროულად მუშაობს ორი ჭავლური ვენტილატორი. როგორც კი ამოქმედდება ხანძარი, მაშინვე იცვლება სიტუაცია (მრუდები 2, 3 და 4). ჰაერის მოძრაობის მიმართულებას და ინტენსიურობას უკვე უფრო მეტად განაპირობებს ხანძრის მიერ აღძრული დინამიკური წნევა, ხოლო ვენტილატორების გავლენა შემცირების ტენდენციით ხასიათდება. აღსანიშნავია, რომ სიჩქარის პროფილების ყველა წარმოდგენილი ნახაზი ცხადყოფს, რომ წნევის ცვალებადობა ვრცელდება ბგერის სისწრაფით, რაც ანალოგიური სისწრაფით სათანადო შედეგების ცვალებადობას იწვევს.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ვგეგმავთ კვლევებს რომელიც ერთმანეთისაგან გამიჯნავს შემთხვევებს: 1. როცა არსებული კლასიკური ცოდნის ფარგლებში შესაძლებელი იქნება საგანგებო ვენტილაციის პროექტების დამუშავება სიცოცხლის გადარჩენის მიზნით; 2. როცა ანალოგიური პროექტების შესასრულებლად საკმარისი აღარ არის არსებული ცოდნა და საჭიროა ახალი კვლევის შედეგები საკითხისადმი ახლებური მიდგომის უზრუნველსაყოფად.

1.2. დაგეგმილი პროექტის აქტუალობა

ცხადია, რომ ამ დიდი მნიშვნელობის პრობლემის გადაჭრა აქტუალურია ჩვენი ქვეყნისათვის და ეს მასშტაბი არანაირად არ აკნინებს პრობლემის მნიშვნელობას. თუმცა პრობლემა უფრო აქტუალური და უფრო დიდი მასშტაბისაა, რადგან არა მარტო საგზაო მოძრაობის მონაწილეები უშვებენ შეცდომებს ვენტილაციის შესაძლებლობებისა და ვითარების შეფასებისას ხანძრის შემთხვევაში, არამედ ძალიან მაღალი კვალიფიკაციის აღიარებული ექსპერტებიც. მაგალითად, შესაძლებელია განვიხილოთ ექსპერტების დასკვნა სენ-გოტარდის გვირაბში მომხდარ ხანძართან დაკავშირებით: UN, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe, Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels, Report TRANS/AC.7/11, February, 2002. აღნიშნული დასკვნის მე-8 პუნქტში აღნიშნულია, რომ გვირაბის ვენტილაცია მუშაობდა ეფექტურად, ხოლო მე-9 პუნქტის თანახმად, ადამიანები დაიღუპა ტოქსიკური აირებით სუნთქვის შედეგად, ანუ ვენტილაცია არ იყო ეფექტური. მოგვყავს მითითებული პუნქტები: “8. The rescue team had arrived on the scene of the accident within 2 minutes. The smoke was contained in a two-kilometre stretch of the tunnel. All the tunnel facilities such as emergency lighting, ventilation, traffic management, etc. functioned as planned and efficiently. 9. The 11 victims were found 1 to 2 kilometres away from the fire. None of them had injuries. All died from toxic smoke inhalation. Some of the victims were found dead at the wheel of their vehicle...”

ეს მაგალითი ხაზს უსვამს იმას, რომ ტექნიკური ეფექტიანობის შეფასება უნდა დაეფუძნოს არა მხოლოდ სისტემის ფუნქციურ პარამეტრებს, არამედ რეალურ შედეგებს სიცოცხლის გადარჩენის თვალსაზრისით. NSDC-ის მიდგომა ითვალისწინებს სივრცის ისეთნაირ დაგეგმარებას, სადაც ტექნიკური, სოციალური და უსაფრთხოების კომპონენტები ინტეგრირდება ერთიან სტრატეგიაში (გვ. 8, 26).

ჩვენს ნაშრომებში [3, 5] თეორიულად ვაჩვენეთ, რომ გვირაბში მომხდარი ძლიერი ხანძრის შემთხვევაში, გარკვეული პერიოდის შემდეგ, დომინანტი ხდება ხანძრის მიერ აღძრული წევა, ხოლო ვენტილატორების მიერ განვითარებული წევა ჰაერის ნაკადის მოძრაობის მიმართულებაზე გავლენას ვეღარ ახდენს. ეს აიხსნება იმით, რომ მითითებული სიდიდეები ერთმანეთთან ალგებრულად იკრიბება, ხოლო მათი ურთიერთსაპირისპირო მიმართულება იწვევს ვენტილატორების მწარმოებლურობის განულებას მას შემდეგ, რაც ხანძარი მიაღწევს სათანადო სიმძლავრეს.

მსოფლიოს გვირაბებში უკვე მომხდარი ძლიერი ხანძრები ცხადად აყენებენ უბედურების აცილებისათვის მზადმყოფი სავენტილაციო სისტემის დამუშავების საკითხს სატრანსპორტო გვირაბისათვის. გვირაბების ნაწილში შემთხვევით გადარჩნენ ადამიანები, ხოლო მითითებული სენ-გოტარდის, აგრეთვე მონბლანისა და ფრეჟიუს გვირაბებში ადგილი ჰქონდა ადამიანების მსხვერპლს.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ხანძრის პირობებში უბედურების შესარბილებელი სავენტილაციო სისტემის დამუშავება რიკოთის უღელტეხილის ფარგლებში ფუნქციონირებად ახალი გვირაბებისა და ჩაქვი-მანინჯაურის ტყუპი გვირაბებისათვის აქტუალურია როგორც მიწისქვეშა ნაგებობების ვენტილაციის სფეროსათვის, ისე საქართველოს ეკონომიკის მდგრადი განვითარებისათვის.

1.3. დასახული მიზნის მიღწევის სამუშაო ჰიპოთეზა

სამუშაო ჰიპოთეზა დაფუძნებულია გვირაბის პროფილის მიხედვით გამოვლენილ კრიტიკულ ადგილებში სხვადასხვა სიმძლავრის ხანძრის სავარაუდო სცენარების განხილვაზე და იმ მარტივ ვარაუდზე, რომ სისტემის კოლაფსამდე მაქსიმალურად უნდა გამოვიყენოთ ვენტილაციის შესაძლებლობები და მათ შორის უკუდინების მოვლენაც (თუ მას ადგილი ექნა) ევაკუაციის მიზნებისათვის. კოლაფსის პერიოდის ძალაში შესვლის შემდეგ კი, პირიქით - ვენტილაცია უნდა შეიზღუდოს (გვირაბის აეროდინამიკური წინაღობა უნდა გაიზარდოს), რადგან ჰაერის ნაკადის მიმართულება აღარ იქნება პროგნოზირებადი. ვენტილაციის შეზღუდვის ერთ-ერთი გზაა ტრანსფორმირებადი სისტემებით სარგებლობა, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება კოსმოსში და ისეთ ადგილებში, სადაც ადამიანთა შეღწევა გართულებულია. აღნიშნულთან დაკავშირებით იხილეთ ჩვენი ნაშრომი [6].

სამუშაო ჰიპოთეზა აგრეთვე ეფუძნება CFD-მოდელების გამოყენებას ხანძრების სხვადასხვა სცენარებისათვის, მოდელები შედგენილი იქნება გვირაბის პროფილის მიხედვით განსაზღვრული კრიტიკული ადგილებისათვის და მათში გათვალისწინებული იქნება ვენტილაციის სქემის, გრძივი დახრის, სითბოსა და კვამლის გენერაციის, მათი გავრცელებისა და პროცესის მახასიათებელი სხვა მნიშვნელოვანი პარამეტრების გავლენა.

აღნიშნული ჰიპოთეზა სრულად შეესაბამება NSDC-ის პრინციპს, რომლის მიხედვითაც ინფრასტრუქტურული სისტემები უნდა იყოს ადაპტირებადი, პროგნოზირებადი და ტრანსფორმირებადი კრიზისულ პირობებში (გვ. 26). ვენტილაციის სისტემების მოქნილი მართვა და სივრცითად ინტეგრირებული ევაკუაციის სტრატეგიები ქმნის სიცოცხლისუნარიანობის ახალ სტანდარტს.

1.4. მრავალფაქტორიანი დინამიკური მოდელის შესახებ

ავარიული ვენტილაციის დაპროექტების საერთაშორისო რეკომენდაციები [16, 17], აგრეთვე მსოფლიოს ერთ-ერთი ყველაზე განვითარებული ქვეყნის - აშშ-ის სახანძრო უსაფრთხოების სახელმძღვანელო [7] იზიარებენ დებულებას, რომ სავენტილაციო ნაკადის კრიტიკული სიჩქარე არის მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური მაჩვენებელი, რომლითაც შესაძლებელია კვამლის კონტროლი განხორციელდეს სატრანსპორტო გვირაბებში ხანძრის უკლებლივ ყველა შემთხვევაში. იგივე აზრი გატარებულია მრავალ სამეცნიერო ნაშრომშიც, რომელთა შორის აღვნიშნავთ მხოლოდ სახელმძღვანელო ლიტერატურას [18]. აღნიშნული მოხდა მას შემდეგ, რაც გამოქვეყნდა რ. ტომასის ნაშრომი "The movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires" 1958 წელს [19]. ამ დებულების უკრიტიკოდ მიღება თანამედროვე პირობებში დიდი შეცდომაა, რაც დამაჯერებლად იქნება ნაჩვენები ქვემოთ. აქ კი აღვნიშნოთ, რომ იდეა კრიტიკული სიჩქარის შესახებ ეფუძნება ფრუდის რიცხვის მუდმივობას, ხოლო ქვემოთ ვაჩვენებთ, რომ ფრუდის რიცხვი არ არის მუდმივი სიდიდე რეალური ხანძრების პირობებში.

მამასადამე, გრძივი ვენტილაციის პირობებში, კრიტიკული სიჩქარე ავარიული ვენტილაციის სტრატეგიაში მიღებული იყო როგორც გადამწყვეტი ფაქტორი უკუდინების პრევენციისათვის. უკუდინება არის წვის პროდუქტების საპირისპირო გავრცელება აღმავალ სავენტილაციო ნაკადზე, ჰერმეტიზებული გვირაბის იმ ნაწილში, სადაც სუფთა ჰაერი უნდა იყოს. აღნიშნულს იწვევს წვის პროდუქტების მაღალი ტემპერატურა, ამის გამო მათი ნაკლები სიმკვრივე და ცურვადობა ამომგდები ძალის ხარჯზე. ეს მეტად საშიში მოვლენაა ევაკუაციის შემთხვევაში სიცოცხლის გადარჩენის თვალსაზრისით. აღნიშნულს განსაკუთრებით გამოკვეთილად ადგილი აქვს მაშინ, თუ ჰაერის ნაკადი მოძრაობს ჰიფსომეტრიულად მაღალი ნიშნულიდან დაბალისაკენ, ხოლო ხანძრის კერა არის დაბალ ნიშნულზე.

კრიტიკული სიჩქარე კი არის უკუდინების გამომრიცხავი მინიმალური სიჩქარე, რომელიც უნდა მიენიჭოს სავენტილაციო ნაკადს. კრიტიკული სიჩქარე დამოკიდებულია ხანძრის სიმძლავრეზე, გვირაბის განივკვეთსა და დახრილობაზე, აგრეთვე სხვა ფაქტორებზე. იმის გამო, რომ ხანძრით განვითარებული დინამიკური წნევა და ჭავლური ვენტილატორებით განპირობებული ანალოგიური წნევა ერთმანეთთან ალგებრულად იკრიბება, რომ არ მოხდეს გვირაბის სუფთა ჭავლიანი ნაწილის დაკვამლიანება, საჭიროა სუფთა ჰაერის ჭავლს ექნეს კრიტიკულ სიჩქარეზე უფრო მაღალი სიჩქარე. აქედან გამომდინარე, იდეის თანახმად, გრძივი სავენტილაციო სისტემის პირობებში, კრიტიკული სიჩქარის მქონე ჭავლი კვამლსა წვის სხვა მავნე პროდუქტებს ხანძრის კერიდან მხოლოდ ერთ მხარეზე გამოდევნის, ხოლო მეორე მხარეზე სუფთა ჰაერი უნდა იყოს.

ჩვენს ნაშრომში [14] კლაპეირონის განტოლების გამოყენებით მიღებულია, რომ 1000 °C ტემპერატურის მქონე ხანძრის მიერ აღძრული დინამიკური წნევა, გვირაბებში შეადგენს 121.6 კპა, რაც აღემატება ატმოსფერულ წნევას, ხოლო 8-ჯერ ყველაზე მძლავრი ვენტილატორების მაქსიმალურ სტატიკურ წნევას. ამ დროს ჰაერის სიმკვრივე შემცირებულია 0.277 კგ/მ³-მდე. შესაბამისად, ძლიერი ხანძრის შემთხვევაში პრაქტიკულად შეუძლებელი გახდება სავენტილაციო ნაკადის მართვა ვენტილატორების მეშვეობით და ჰაერის მოძრაობის მიმართულება და ხარჯი განპირობებული იქნება ხანძრის მიერ აღძრული დეპრესიით.

აღნიშნული დებულება წინააღმდეგობაში მოდის კრიტიკული სიჩქარის იდეასთან. ამიტომ ჩვენ შევასრულეთ საცდელი რიცხვითი მოდელირება. რიცხვითი მოდელის მიზანი იყო კრიტიკული სიჩქარის განუხრელი ზრდის დემონსტრირება ხანძრის სიმძლავრის მატების პირობებში [5, 20], აგრეთვე უკუდინების თავიდან ასაცილებლად აღნიშნული ცნებაზე დაფუძნების რეალობასთან შეუსაბამობა რიცხვითი მოდელირების შედეგებისა და ჩვენს მიერ შესრულებული სხვა კვლევების შესაბამისად.

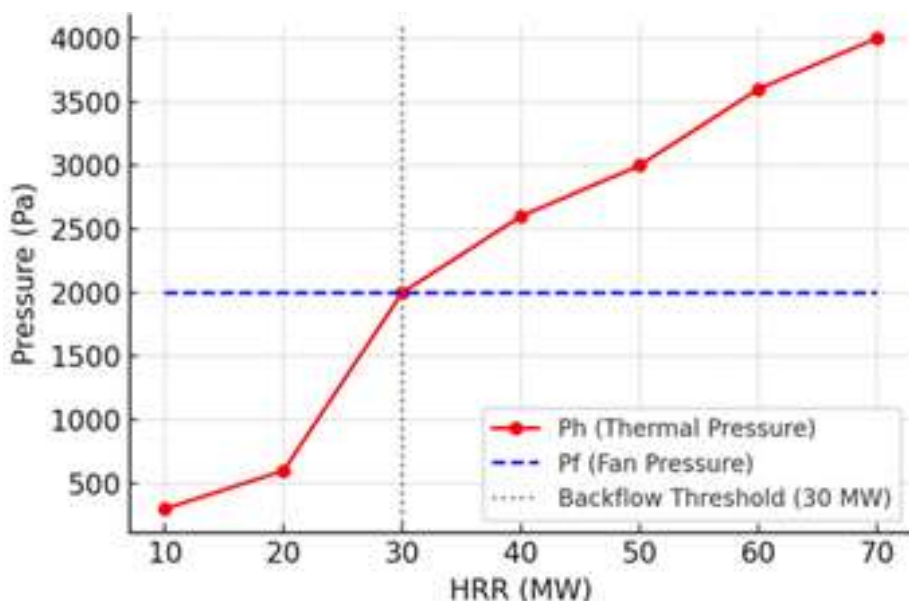
1.5. საგვირაბე ვენტილატორებისა და ხანძრის ურთიერთმოქმედება

გვირავის ჭავჭავი ვენტილატორი, რომელიც ანვითარებს დაახლოებით 2000 პასკალის ტოლ წნევას, ხანძრის შემთხვევაში განიცდის ამ უკანასკნელის გავლენას. დადგენილი ვენტილაციის შემთხვევაში თერმული (ხანძრის) წნევა და მექანიკური (ვენტილატორის) ერთმანეთის საპირისპიროდ არიან მიმართული, ხოლო წნევათა სხვაობა განისაზღვრება ფორმულით

$$\Delta P = P_f - P_h \quad (1.1)$$

სადაც P_f არის ვენტილატორის მიერ განვითარებული წნევა, პა; P_h - ხანძრის მიერ აღძრული დინამიკური წნევა, რომელიც იზრდება ტემპერატურის ზრდასთან ერთად, პა.

ხანძრის სიმძლავრის მიმართ ΔP უკუპროპორციულ დამოკიდებულებას ამჟღავნებს. ხანძრის სიმძლავრის, რაც იგივეა - ტემპერატურის ზრდით ΔP მცირდება. როცა $\Delta P = 0$, მაშინ ვენტილატორის წნევა და ხანძრის მიერ აღძრული დინამიკური წნევა ერთმანეთს აწონასწორებენ, ხოლო ტემპერატურის შემდგომი ზრდა იწვევს კვამლისა და წვის სხვა ტოქსიკური პროდუქტების უკუდინებას, რაც საშიში მოვლენაა სიცოცხლის გადარჩენის კუთხით. საინტერესოა ვენტილატორის წნევის წრფესა, რომელიც დაახლოებით 2000 პასკალის დონეზეა (იხ. ფიგ. 1.4) და ხანძრის მიერ აღძრული თერმული წნევის აღმავალი მრუდის გადაკვეთის წერტილის პოვნა.



ფიგ. 1.4. მექანიკური და თერმული წნევების დინამიკა ხანძრის განვითარების მიხედვით

როგორც ნახაზიდან ჩანს, 70 მგვტ სიმძლავრის ხანძრის განვითარების სცენარის პირობებში, აღნიშნული წრფისა და ხანძრის განვითარების მრუდის გადაკვეთა ხდება წერტილში, რაც შეესაბამება 30 მგვტ ხანძრის სიმძლავრეს. ამ შემთხვევაში $\Delta P = 0$. ნახაზიდან აგრეთვე ჩანს, რომ აღმავალია მრუდი და შესაბამისად ΔP აგრეთვე აგრძელებს ზრდას.

თეორიული ფონი არის იდეალური გაზის მდგომარეობის კლასიკური კანონი, რომელსაც აქვს სახე

$$PV=nRT \quad (1.2)$$

სადაც P არის წნევა, პა; V — კუთრი მოცულობა, მ³; n — გაზის მოლელების რაოდენობა; R — გაზის უნივერსალური მუდმივა, ჯ/(მოლი. K); T — ტემპერატურა, K. კუთრი მოცულობა ჰაერის სიმკვრივესთან დაკავშირებულია ფორმულით

$$V = 1/\rho \quad (1.3)$$

თუ ჰაერის მოცულობა (მოლელების რაოდენობა) უცვლელია, მაშინ წნევა და ტემპერატურა ერთმანეთთან კავშირშია შემდეგი ფორმულით

$$P/T = \text{Const} \quad (1.4)$$

რაც ნიშნავს, რომ ტემპერატურასა და წნევას შორის პირდაპირპროპორციული დამოკიდებულებაა და მისი ზრდისას გაზის წნევა მკვეთრად მატულობს.

ამგვარად, თუ $\Delta P > 0$, ვენტილატორი პრევალირებს ხანძრის მიერ განვითარებულ წნევაზე, თუ $\Delta P \approx 0$, ვენტილატორი და ხანძარი ძალთა ბალანსში არიან და ვენტილაციის ეფექტი შეზღუდულია, ხოლო თუ $\Delta P < 0$, ხანძრის ზონაში წნევა აღემატება ვენტილატორის წნევას — ვენტილატორი ვეღარ უზრუნველყოფს ვენტილაციას, მოხდება კვამლისა და წვის სხვა ტოქსიკური პროდუქტების უკუდინება. ზემოაღნიშნული, როგორც აღინიშნა, შეესაბამება დადებით ვენტილაციის შემთხვევას. დადებით ვენტილაციის პირობებში ვენტილატორისა და ხანძრის მიერ აღძრული ნაკადები ერთი მიმართულებისაა და ისინი ერთმანეთს აძლიერებენ, რაც იმასაც ნიშნავს რომ ვენტილატორისა და ხანძრის მიერ აღძრული ნაკადები ერთმანეთთან ყოველთვის ალგებრულად იკრიბებიან.

გვირაბის სავენტილაციო 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 დიობებისაყენ. აღნიშნული კონტროლირებადი ნაკადი საჭიროა უსაფრთხოების სტრატეგიებისა და ევაკუაციის მარშრუტების დაგეგმვისთვის.

მნიშვნელოვანია გავითვალისწინოთ, რომ ხანძარი მაქსიმალურ სიმძლავრეს მაშინვე კი არ აწვითარებს, არამედ, საბოლოოდ 30 მეგავატს მიღწეული ხანძარი თანდათან გაიზრდება ამ მნიშვნელობამდე თბოგამოყოფის ზრდის მრუდის მიხედვით, რაც დამოკიდებულია გამოყენებული საწვავის სახეობაზე, გვირაბის 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 ეფექტურობის მთავარი შეზღუდვა არის თერმული წინაღობა. ხანძრის დროს ვენტილატორი ექსტრემალურ ტემპერატურაზე არის დამოკიდებული და ტემპერატურის მატებასთან ერთად, მისი მასალები დეგრადირდება და საკისრები, ელექტრონიკა და სხვა კრიტიკული კომპონენტები მწყობრიდან გამოდის. თუ

ვენტილაციის ზონაში ტემპერატურა აღემატება საპროექტო ლიმიტებს (როგორც წესი, დაახლოებით 250-400°C ვენტილატორის 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 წინაღობის 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.

ამრიგად, ვენტილაციის სისტემების პროექტმა უნდა გაითვალისწინოს არა მხოლოდ ვენტილატორის სიმძლავრე, არამედ გვირაბის გეომეტრია, რადგან განივი კვეთის პროფილი პირდაპირ გავლენას ახდენს იმაზე, თუ როგორ გადაეცემა მიწოდებული ენერგია კონტროლირებად ნაკადის ველს და რამდენად ეფექტურად შეუძლია მას ხანძრით გამოწვეულ 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 გამოსაყენებელია ჩვენს მიერ შემოტანილი დებულება იმის შესახებ, რომ თერმული და მექანიკური ნაკადები ალგებრულად იკრიბებიან გვირაბების სავენტილაციო სისტემებში.

შემოთავაზებულმა მრავალფაქტორიანმა დინამიკურმა მოდელმა მხედველობაში უნდა მიიღოს: 1. თბოგამოყოფისა და ხანძრის გავრცელების დროში ცვალებადი ბუნება; 2. მექანიკური ვენტილაციის მუშაობის გაუარესება ხანძრის განვითარების კვალობაზე, ეს განსაკუთრებით შეეხება დაღმავალ ვენტილაციას ადვილად მისახვედრი მიზეზებით; 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 დამაზიანებელი ფაქტორების (მაღალი ტემპერატურა, კვამლი, ტოქსიკური ნამწვი აირები და სხვ.) კრიტიკული ზღურბლების დადგომის დროის შუალედის ფარგლებში.

1.6. 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

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gH\Delta\rho/\rho_0}} \quad \text{ან} \quad Fr = \frac{u}{\sqrt{gH\Delta T/T_0}} \quad (1.5)$$

სადაც u არის სავენტილაციო ნაკადის სიჩქარე, მ/წმ; g - დედამიწის მიზიდულობის აჩქარება, 9.81 მ/წმ²; 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, 293,2 K. წნევისა და ტემპერატურის ნაზარდები შესაბამისად იანგარიშება ფორმულებით

$$\Delta\rho = \rho_0 - \rho_h \quad (1.6)$$

$$\Delta T = T_0 - T_h \quad (1.7)$$

(1.6) და (1.7) ფორმულებში ρ_h არის ჰაერის სიმკვრივე T_h ტემპერატურაზე, კგ/მ³; $T_0 = 293,2$ K გარე ჰაერის ტემპერატურა; T_h - სავენტილაციო ჰაერის ტემპერატურა ხანძრის პირობებში, K.

შესაძლებელია ფორმულებს (1.5) მივცეთ ხელით ანგარიშისათვის უფრო მოსახერხებელი სახე

$$Fr = \frac{u\sqrt{\rho_0}}{\sqrt{gH\Delta\rho}} \quad \text{ან} \quad Fr = \frac{u\sqrt{T_0}}{\sqrt{gH\Delta T}} \quad (1.8)$$

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 ნაძვნი აირების თანაფარდობა არის 50% - 50%; 3. გვირაბის სიგანისა და სიმაღლის თანაფარდობა არის 1.6 (რაც შეესაბამება გვირაბის სიგანეს 8 და სიმაღლეს 5 მ). აღსანიშნავია, 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. თანამედროვე მრავალზოლიანი გვირაბი ხასიათდება დიდი სიგანით (15 მ და უფრო მეტი), რთული გეომეტრიით უცვლელი ჭერის სიმაღლის (5 მ) 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

$$Fr' = \frac{\Delta \rho g H}{\rho_0 u_c^2} \quad (1.9)$$

(1.5) ან (1.8) და (1.9) ფორმულებით განსაზღვრულ სიდიდეებს შორის დაცულია თანაფარდობა

$$Fr' = 1/Fr^2 \quad \text{ან} \quad Fr = 1/\sqrt{Fr'} \quad (1.10)$$

აღნიშნული ფორმულები გამოიყენება ვენტილაციის სიძლიერის შესაფასებლად ცხელი აირების საპირისპირო მოძრაობის შემთხვევაში დაღმავალი სავენტილაციო ნაკადების პირობებში. თუ $Fr' < 2$, ვენტილაცია ძლიერია და ჰაერის ნაკადის უკუდინება ცხელი გაზების აღმავალი მოძრაობის გამო არ აღიძვრება. როცა $Fr' > 2$, მაშინ ვენტილაცია სუსტია ხანძრის მიერ აღძრულ წევასთან შედარებით და ადგილი აქვს კვამლისა და წვის აირების უკუდინებას.

ხანძრის სიმძლავრის ცვალებადობასთან ერთად იცვლება ფრუდის რიცხვის რიცხვითი სიდიდე, რაც ჩანს ქვემოთ მოცემული ცხრილიდან 1.1. გაანგარიშებებისათვის ცხრილში მიღებულია შემდეგი სიდიდეები: u - ვენტილაციის საშუალო სიჩქარე, 3.5 მ/წმ; g - მიზიდულობის აჩქარება, 9.81 მ/წმ²; H - გვირაბის სიმაღლე, 5.0 მ; T_h - გარემოს ჰაერის ტემპერატურა, 293.2 K; ρ_0 - გარემოს ჰაერის სიმკვრივე, 1.2 კგ/მ³.

ცხრილი 1.1. ფრუდის რიცხვის ცვალებადობა ხანძრის სიმძლავრის მიხედვით

N	ხანძრის სიმძლავრე Q , მგვტ	ჰაერის ტემპერატურა T_h , K	ჰაერის სიმკვრივე ρ_h , კგ/მ ³	ჰაერის სიჩქარე u , მ/წმ	თერმული წნევა P_h , პა	ფრუდის რიცხვი Fr'
1	10	393	0.896	3.5	~600	1.01
2	20	493	0.715	3.5	~1200	1.62
3	30	593	0.596	3.5	~1800	2.01
4	50	693	0.517	3.5	~2400	2.28
5	70	793	0.459	3.5	~3000	2.47
6	100	893	0.411	3.5	~3600	2.63
7	150	993	0.374	3.5	~4200	2.75

1.7. ფრუდის რიცხვის შეზღუდულობა

როგორც ნაჩვენებია, მიუხედავად იმისა, რომ ფრუდის რიცხვი ვენტილაციის იმპულსსა და კვამლის ამწევ ძალას შორის ბალანსის შესაფასებლად ღირებულ ინსტრუმენტად რჩება, მისი გამოყენებადობა რეალური გვირაბის ხანძრის პირობებში ძალიან შეზღუდულია. ფრუდის რიცხვის კრიტიკული ზღურბლებისთვის საჭირო იდეალური დაშვებები, როგორიცაა ფიქსირებული გეომეტრიული მაჩვენებლები, აირის ნარევის ერთგვაროვნება და ჰაერის მუდმივი სიმკვრივე, იშვიათად სრულდება თანამედროვე გვირაბების ექსპლუატაციის პრაქტიკაში.

გარდა ამისა, ხანძრის განვითარების დროითი ცვალებადობა, წვის პროდუქტების თერმოფიზიკური თვისებების ცვლილებასთან და არაწრფივ გეომეტრიასთან ერთად, იწვევს Fr-ის მნიშვნელოვან ცვლილებებს ხანძრის განვითარების მთელი ციკლის განმავლობაში. გამოთვლითი სითხის დინამიკის (CFD) მოდელები, როგორც წესი, მოიცავს ამ პარამეტრს, მაგრამ მხოლოდ Fr-ის გამოყენებამ მრავალი წყაროს ურთიერთქმედების გათვალისწინების გარეშე შეიძლება გამოიწვიოს უსაფრთხოების ზედმეტად გამარტივებული პროგნოზები. ამიტომ, შემოთავაზებული მრავალფაქტორიანი მოდელის ფარგლებში ფრუდის რიცხვი განხილული უნდა იქნეს არა როგორც ფიქსირებული წერტილი, არამედ როგორც დინამიკური პარამეტრი, რომელიც მგრძნობიარეა ცვალებადი პირობების მიმართ. აღნიშნული პირობებია:

- ხანძრის ინტენსიურობისა და ტემპერატურის ცვლილება დროის განმავლობაში,
- გვირაბის გეომეტრიისა და დახრილობის ცვლილება,
- ჰაერის ნაკადის მიმართულების ცვალებადობა და მისი სტრატეგიკაცია,
- სიმკვრივისა და წნევის ადგილობრივი გრადიენტები.

ასეთი მოდელი გვირაბის ვენტილაციის სისტემების დიზაინისთვის და ევაკუაციის სტრატეგიების კოორდინაციისთვის უფრო რეალისტურ, მყარ და უსაფრთხო საფუძველს ქმნის.

1.8. სახანძრო უსაფრთხოების ინტეგრირებული მოდელირება

პრობლემის არსი.

საავტომობილო გვირაბებში ხანძრის მოდელირებისას გამოიყენება CFD მეთოდები, რათა მაღალი სიზუსტით მივიღოთ:

- ტემპერატურული ველის ცვალებადობა;
- კვამლის გავრცელება;
- ნახშირჟანგისა და სხვა ტოქსიკური გაზების კონცენტრაციის ცვალებადობა;
- ხილვადობის ცვალებადობა;
- ჰაერის სიჩქარისა და მოძრაობის მიმართულების ცვალებადობა.

CFD მოდელირება საჭიროებს მცირე დროით ბიჯს (მაგალითად, 0.1 – 1.0 წამი), რათა აღწეროს სწრაფად ცვლადი პროცესები, განსაკუთრებით ხანძრის განვითარების პირველ

წუთებში მხედველობაშია 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).

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 მოდელებისთვის 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.

ამგვარად, ევაკუაციის მოთხოვნები უნდა აისახოს ვენტილაციის პრიორიტეტებზე, ხოლო ვენტილაცია უნდა ეხმარებოდეს უსაფრთხო გადაადგილებას. როგორც წინასწარ დაგეგმვის, ისე რეალურ დროში რეაგირებისთვის, მსგავსი მოდელი აუცილებელია.

ზემოაღნიშნულიდან ცხადია, რომ საავტომობილო გვირაბებში ხანძრის დროს სიცოცხლის უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად აუცილებელია სრულად ინტეგრირებული მოდელირების გამოყენება, რომელიც ერთიანად მოიცავს ვენტილაციის დინამიკას, ხანძრის განვითარების კანონზომიერებებს, ევაკუაციის მარშრუტების შეფასებას, აგრეთვე მავნე და ტოქსიკური ზემოქმედების ზღვრების დადგენას.

ტრადიციული ერთფაქტორიანი მოდელები, მაგალითად, მხოლოდ კრიტიკულ სიჩქარეზე დამყარებული ან სტატიკურ ფრუდის რიცხვზე დაფუძნებული მოდელები, ვერ ასახავენ რეალურ პირობებში ცვლად სცენარებს და ქმნიან სიმულაციების ზედაპირულ ხედვას. სწორედ ამიტომ საჭიროა მრავალკომპონენტიანი სიმულაციური ჩარჩოს შექმნა.

ასეთი ინტეგრირებული სახანძრო უსაფრთხოების მოდელი უნდა მოიცავდეს:

- ვენტილაციის წნევის დინამიკას – თერმული და მექანიკური გავლენის გაზომვა დროისა და სივრცის ჭრილში;
- თბოგამოყოფის პროგრესს – რეალური წვის ფაზების განსაზღვრით საწვავის ტიპისა და გვირაბის გეომეტრიის მიხედვით;
- ევაკუაციის მოდელირებას – ადამიანების გადაადგილების სიმულაციით ხილვადობის, ტემპერატურისა და ტოქსიკურობის ცვალებად პირობებში;
- თერმული ველის რუკების შექმნას – ცხელი აირების გავრცელების პროგნოზირებით უსაფრთხოების ზონების შეფასებისთვის;
- CFD ანალიზს – ჰაერის ნაკადის, სითბოს გადაცემისა და დამაზიანებელი ნივთიერებების გავრცელების მოდელირებისთვის;
- სტრუქტურული გეომეტრიის ინტეგრაციას – დახრილობის, განივკვეთისა და ბარიერების გავლენების გათვალისწინებით.

მხოლოდ ასეთ კომპლექსურ მოდელს შეუძლია წინასწარ განსაზღვროს არა მხოლოდ პიკური მაჩვენებლები, არამედ მნიშვნელოვანი ფაქტორების დროითი ცვლილებები – როგორ სწრაფად ვითარდება კრიტიკული სიტუაციები და რამდენად ეფექტიანია არსებული შემარბილებელი ღონისძიებები (მაგ: საგანგებო ვენტილაციის ჩართვა, გასასვლელების გამოყენება და ა.შ.).

1.9. შემაჯამებელი მოსაზრებები

სატრანსპორტო გვირაბების უსაფრთხო ექსპლუატაციის საკითხი, განსაკუთრებით სავენტილაციო სისტემების კოლაფსის რისკების პირობებში, წარმოადგენს არა მხოლოდ საინჟინრო გამოწვევას, არამედ სივრცითი დაგეგმარების სტრატეგიულ ამოცანას. წარმოდგენილი რიცხვითი მოდელირება ცხადად აჩვენებს, რომ კრიტიკული სიჩქარის კონცეფცია, რომელიც კლასიკურ მიდგომებზეა დაფუძნებული, ვერ უზრუნველყოფს სიცოცხლის გადარჩენის საკმარის გარანტიას ძლიერი ხანძრის

პირობებში. ამ დროს, ჰაერის ნაკადის მართვა ვეღარ ხორციელდება ვენტილატორების მეშვეობით, ხოლო დინამიკური წნევა, რომელიც ხანძრის მიერ არის აღძრული, ხდება დომინანტი ფაქტორი.

აღნიშნული შედეგები აჩვენებს, რომ აუცილებელია სივრცითი დაგეგმარების პროცესში გათვალისწინებული იყოს:

- სავენტილაციო სისტემების ტრანსფორმირებადობა კრიზისულ პირობებში.
- ევაკუაციის სტრატეგიების სივრცით-ტექნიკური ინტეგრაცია.
- კოლაფსის ფაზის პროგნოზირება და მართვის ალტერნატიული მექანიზმები.
- სიცოცხლისუნარიანობის პარამეტრების ჩაშენება ინფრასტრუქტურულ სტანდარტებში.

საქართველოს სივრცის დაგეგმარების გეგმის კონცეფცია (NSDC) ხაზს უსვამს ინფრასტრუქტურის სიცოცხლისუნარიანობას, კლიმატურ და ტექნოგენურ რისკებზე ადაპტაციას, და ტრანსფორმაციული სტრატეგიების მხარდაჭერას (NSDC, გვ. 25–26). ამ კონტექსტში, გვირაბების უსაფრთხოების სისტემების მოდელირება უნდა გახდეს არა მხოლოდ ტექნიკური კვლევის საგანი, არამედ სახელმწიფო ინვესტიციების პლატფორმის ნაწილი (NSDC, შედეგი 2, გვ. 34), რომელიც უზრუნველყოფს სტაბილურობას, რეგიონულ ინტეგრაციას და საერთაშორისო სატრანზიტო დერეფნის უწყვეტ ფუნქციონირებას.

დასკვნის სახით, წარმოდგენილი კვლევა:

- ამყარებს საჭიროებას ახალი სივრცითი სტანდარტების შემუშავებისთვის.
- აძლიერებს „ხედვა 2030“-ის პრიორიტეტებს — უსაფრთხოება, მდგრადობა, ეკოლოგიური პასუხისმგებლობა.

- ქმნის საფუძველს ინოვაციური ტექნოლოგიების დანერგვისთვის.
- უზრუნველყოფს სიცოცხლის გადარჩენის სტრატეგიების სივრცით ანალიზს.

ამგვარად, სატრანსპორტო გვირაბების უსაფრთხოების საკითხის ინტეგრაცია საქართველოს სივრცით სტრატეგიაში წარმოადგენს არა მხოლოდ ტექნიკურ, არამედ პოლიტიკურ, ეკონომიკურ და სოციალურ აუცილებლობას. ეს ინტეგრაცია არის წინაპირობა ქვეყნის გრძელვადიანი მდგრადი განვითარების, რეგიონული კავშირების გაძლიერებისა და საერთაშორისო სტანდარტებთან შესაბამისობისთვის.

საქართველოს სივრცის დაგეგმარების გეგმის კონცეფცია (NSDC) მხედველობაში არ ღებულობს და არც უნდა ღებულობდეს კონკრეტული დარგის სპეციალისტების მიერ გადასაწყვეტ ამოცანებს, რომლებიც ეჭვგარეშე წარმოადგენენ მოცემული კონცეფციის ხორცშესხმას. კონცეფცია თემატურადაც არ უნდა იყოს ფოკუსირებული აღნიშნულ ამოცანებზე და მიაწოდებდეს მხოლოდ მოცემული ამოცანების გამომყენებელი დარგის სტრატეგიულ მნიშვნელობაზე.

ინდუსტრიული პრეზენტაციებისა და საგანმანათლებლო მასალების შექმნა, რისკების პროგნოზი, შეფასება, მავნე გავლენის შემცირება მოქმედების ცხადი ალგორითმის შემუშავება, ტრენინგისა და სასწავლო განგაშების ჩატარება დარგის

სპეციალისტების საქმეა, რომელთა შესრულების მეთოდოლოგია წინამდებარე ნაშრომში მეტ-ნაკლები სისრულით არის გადმოცემული. მეთოდოლოგია ეფუძნება კონკრეტულ გლობალურ სტანდარტებსა და ევროკავშირის მიღებულ უსაფრთხოების პრინციპებს.

საავტომობილო გვირაბებში ხანძრის პირობებში ვენტილაციის ეფექტიანი მართვა შეუძლებელია მხოლოდ კრიტიკული სიჩქარის სტანდარტულ დებულებაზე დაფუძნებით. რეალური ხანძრების პირობებში ფრუდის რიცხვი, რომელიც ამ მოდელის საფუძველია, არ არის მუდმივი სიდიდე. ხანძრის სიმძლავრის, გვირაბის გეომეტრიის, დახრილობის, სიმკვრივის ცვალებადობისა და სხვა ფაქტორების გათვალისწინების გარეშე ვენტილაციის სისტემები შეიძლება გახდეს არაეფექტური.

რიცხვითი მოდელირებისა და თეორიული ანალიზის საფუძველზე ნაჩვენებია, რომ:

- ძლიერ ხანძრებს შეუძლიათ მნიშვნელოვანი თერმული წნევის განვითარება, რომელიც აჭარბებს ვენტილაციის მექანიკურ წნევას, განსაკუთრებით დაღმავალი ვენტილაციის შემთხვევაში;
- ფრუდის რიცხვი ცვალებადია და ხშირად სცდება კრიტიკულ ზღვარს;
- ვენტილაცია წარმატებით მუშაობს მხოლოდ ხანძრის ადრეულ ეტაპებზე, ხოლო შემდეგ ეტაპებზე საჭიროა კომპლექსური მიდგომა;
- ვენტილაციის სისტემის ეფექტურობა მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია გვირაბის გეომეტრიასა და ვენტილაციის კონფიგურაციაზე;
- უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად საჭიროა ევაკუაციის მოდელირებასთან სინქრონიზებული ვენტილაციის მოდელირება.

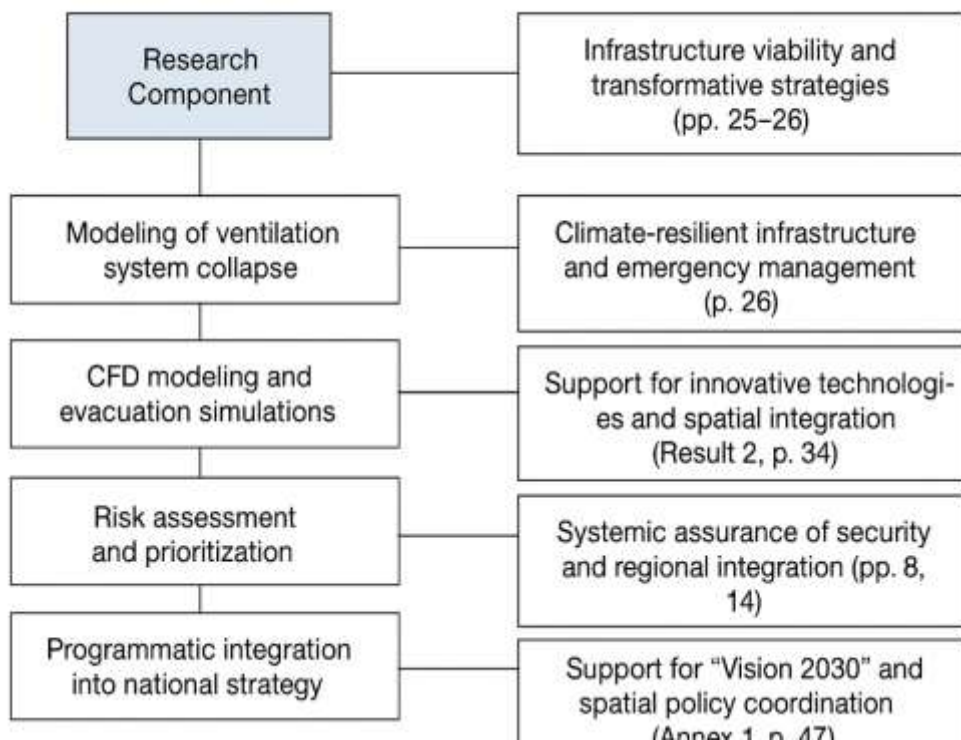
შესაბამისად, სტატიის ფარგლებში შემოთავაზებულია მრავალფაქტორიანი დინამიკური მოდელი, რომელიც ითვალისწინებს:

1. ხანძრის დროში ცვალებად დინამიკას;
2. თერმული და მექანიკური ნაკადების ალგებრულ შეკრებადობას;
3. CFD მოდელირებისა და ექსპერიმენტული მონაცემების ინტეგრაციას;
4. ევაკუაციის სქემების მოქნილ მართვას;
5. გვირაბის გეომეტრიული თავისებურებებისა და ადგილმდებარეობის გავლენის გათვალისწინებას.

აღნიშნული მიდგომა წარმოადგენს საბაზისო ჩარჩოს საგზაო გვირაბების ხანძრისას სავენტილაციო სტრატეგიის გაუმჯობესებისთვის და ადამიანის სიცოცხლის დაცვისთვის კრიტიკულ პირობებში.

დანართი 1.1. შესაბამისობის ცხრილი NSDC-ის მიზნებთან

კვლევის კომპონენტი	შესაბამისი NSDC მიზანი
სავენტილაციო სისტემების კოლაფსის მოდელირება	ინფრასტრუქტურის სიცოცხლისუნარიანობა და ტრანსფორმაციული სტრატეგიები (გვ. 25–26)
CFD მოდელირება და ევაკუაციის სიმულაციები	კლიმატისადმი მედეგი ინფრასტრუქტურა და საგანგებო სიტუაციების მართვა (გვ. 26)
ციფრული დუბლირების დანერგვა	ინოვაციური ტექნოლოგიების მხარდაჭერა და სივრცითი ინტეგრაცია (შედეგი 2, გვ. 34)
რისკების შეფასება და პრიორიტეტიზაცია	უსაფრთხოების სისტემური უზრუნველყოფა და რეგიონული ინტეგრაცია (გვ. 8, 14)
პროგრამული ინტეგრაცია ეროვნული სტრატეგიაში	„ხედვა 2030“-ის მიზნების მხარდაჭერა და სივრცითი პოლიტიკის კოორდინაცია (დანართი 1, გვ. 47)



დანართი 1.2. სტრატეგიული შესაბამისობის ვიზუალური სქემა

2. ხანძრის პირობებში პროფესიული უსაფრთხოების შეფასება

2.1. წინასწარი შენიშვნები

პროფესიული უსაფრთხოების კვლევა წარმოადგენს თანამედროვე ორგანიზაციული პრაქტიკის ფუნდამენტურ მიმართულებას, რომელიც აერთიანებს სხვადასხვა დარგის რისკების ანალიზს და მართვას. ამ ნაშრომში განიხილება კვლევის მეთოდები, რომლებიც გამოიყენება პროფესიულ უსაფრთხოებაში, რათა შეიქმნას უნივერსალური, დარგთაშორისი მოდელი, რომელიც უზრუნველყოფს უსაფრთხოების სისტემურ შეფასებას და გაუმჯობესებას.

ადამიანის მოღვაწეობის ყველა სფეროში რისკის ცნება მოიცავს ყველა იმ შესაძლო საფრთხეს, რომელიც შეიძლება ზიანის მომტანი იყოს როგორც პერსონალის, ისე ინფრასტრუქტურისა და გარემოსათვის. საფრთხის იდენტიფიცირება და შესაბამისი რისკის მართვა კრიტიკულად მნიშვნელოვანია უსაფრთხოების, კეთილდღეობისა და ორგანიზაციული მდგრადობის უზრუნველსაყოფად.

სამუშაო გარემოსა და პროცესების რისკების იდენტიფიკაცია და უსაფრთხო მართვა ხდება კვლევის მეთოდების მომარჯვებით. ისინი უზრუნველყოფენ სისტემური ანალიზის შესრულების შესაძლებლობას და ეფექტური მართვის ზომების შემუშავებას.

წარმოებებისა და ტექნოლოგიური პროცესების განსხვავებულობის მიუხედავად, დარგობრივი დაყოფისა და ადამიანის საწარმოო საქმიანობის ხასიათის მხედველობაში მიღების გარეშე, პროფესიულ უსაფრთხოებას ჩვენ განვიხილავთ გამაერთიანებელ, ზოგადი თვისებებით აღჭურვილ სპეციალობად, რომლის კვლევის მეთოდები შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს პრაქტიკულად ყველა სფეროში დარგობრივი თავისებურებების თუ შეზღუდვების გარეშე. აღნიშნული იდეა გატარებულია ჩვენი მონაწილეობით შესრულებულ უკლებლივ ყველა ნაშრომში, რომელთა შორის შესაძლებელია აღინიშნოს.

ერთი შეხედვით არ უნდა იყოს საერთო ნიშნები რისკებისა და დამდგარ შედეგების მსგავსების თვალსაზრისით ჯანდაცვასა და სამთამადნო მრეწველობას შორის, მაგრამ ეს ასე არაა. უფრო მეტიც, ადამიანის მოღვაწეობის ყველა სფერო დარგობრივი დაყოფის შინაარსის მიუხედავად, ერთნაირი ნიშნებით შესაძლებელია დახასიათდეს. აღნიშნული ნიშნების გამოვლენა, რისკების ტიპიზაცია და სისტემური ანალიზი დამდგარი შედეგების მხედველობაში მიღების გზით, როგორც ქვემოთ დავინახავთ, მხოლოდ პროფესიული უსაფრთხოების კვლევის მეთოდების საშუალებით არის შესაძლებელი.

კვლევის მიზანია ისეთი მეთოდოლოგიური ჩარჩოს შექმნა, რომელიც შესაძლებელს გახდის პროფესიული რისკების შეფასებას და მართვას დარგობრივი სპეციფიკის მიუხედავად.

2.2. ძირითადი ცნებები

საფრთხე – ზიანის პოტენციური წყარო. ზიანი შესაძლებელია მიადგეს ადამიანებს, ინფრასტრუქტურას, გარემოს. ადამიანის შემთხვევაში ზიანი გამოიხატება დაავადებებით, ტრავმიანობით, ან ჯანმრთელობის სხვაგვარი მოშლით ერთეული ან ჯგუფური შემთხვევის პირობებში. ინფრასტრუქტურის შემთხვევაში ზიანი გამოიხატება შენობა-ნაგებობის სრული ან ნაწილობრივი ნგრევით. გარემოს ზიანი შესაძლებელია მიადგეს ტოქსიკური, ფეთქებადი და სხვა სახიფათო ნივთიერებების, ან ხანძრის გავრცელებით, რომელიც იმოქმედებს აგრეთვე ფლორასა და ფაუნაზე.

ერთეული შემთხვევა – ზიანის ერთეულ შემთხვევასთან საქმე გვაქვს, როცა ის მიადგება მხოლოდ ერთ ადამიანს.

ჯგუფური შემთხვევა – არის მაშინ, თუ ზიანი მიადგა ერთზე მეტ ადამიანს.

საშიში სიტუაციები – პირობები, სადაც არსებობს ზიანის მიღების რეალური ალბათობა.

საფრთხის სიმძიმე (ინტენსიურობა) – კონკრეტული საფრთხის სიდიდის ან სიმძიმის ხარისხი. განსაკუთრებით გაძლიერებულია საფრთხეების საშიშროება სტიქიური მოვლენებისა და ბუნებრივი კატასტროფების დროს.

რისკი – საშიშროების რეალიზაციის ალბათობა და მასთან დაკავშირებული ზიანის სიდიდე. როდესაც ვსაუბრობთ რისკზე, აუცილებელია განვასხვავოთ მისი რეალიზაციის **ალბათობა** (რამდენად ხშირად შეიძლება მოხდეს) და **სიმძიმე** (რამდენად მძიმე შედეგი მოჰყვება).

უსაფრთხოება – მდგომარეობა, სადაც საფრთხეები და რისკები შემცირებულია მისაღებ დონემდე.

პროფესიული უსაფრთხოება – პროფესიულ საქმიანობასთან დაკავშირებული უსაფრთხოების ისეთი გარემოს შექმნა ადამიანისათვის, რომ გამოირიცხოს მისი ჯანმრთელობის ან სხვაგვარი დაზიანება.

რისკების შეფასება – პროცესია, რომლის საშუალებითაც განისაზღვრება რისკის დონე, მისი წყაროები და ზემოქმედების მასშტაბი.

რისკების მართვა – დონისძიებების ერთობლიობაა, რომელიც მიმართულია იდენტიფიცირებული რისკების შემცირებაზე ან გამორიცხვაზე.

რისკების მართვის ეტაპები – საფრთხეების იდენტიფიკაცია, რისკის ხარისხობრივი/რაოდენობრივი შეფასება, პრიორიტეტების განსაზღვრა, კონტროლის ზომების დაგეგმვა, მონიტორინგი და შედეგების შეფასება. სამუშაო პროცესებზე დაკვირვება და უკუკავშირის მიღება. ყოველივე აღნიშნული ეხმარება უსაფრთხოების დონის გაუმჯობესებას.

2.3. პროფესიულ უსაფრთხოებაში გამოყენებული კვლევის მეთოდები

პროფესიულ უსაფრთხოებაში გამოყენებული კვლევის მეთოდები უზრუნველყოფს სისტემურ მიდგომას პრობლემების გაგებისათვის და გადასაჭრელად. იგი შედგება სხვადასხვა მეთოდების, ტექნიკისა და მეთოდოლოგიისაგან, ანუ კვლევის გეგმისაგან, რომლებიც ვალიდურობას, სიზუსტესა და სანდოობას უზრუნველყოფენ. პროფესიულ უსაფრთხოებაში გამოიყენება კვლევის შემდეგი მეთოდები:

- დაკვირვება – უშუალო ფაქტების შეგროვება.
- შედარება – მონაცემების შეჯერება განსხვავებებისა და მსგავსებების დასადგენად. მაგალითად, ერთმანეთს შედარდება ქვეყნების, რეგიონების, ცალკეული ობიექტების მონაცემები ოპტიმალური შედეგების გამოსავლენად და გასავრცობად, ან აშკარად ნეგატიური მიდგომების თავიდან ასაცილებლად.
- ექსპერიმენტი – რეალურად მიმდინარე პროცესების პირობების შეცვლა ახალი შედეგების მისაღებად ან გასაზომად.
- სტატისტიკური ანალიზი – მონაცემების რაოდენობრივი დამუშავება.
- მოდელირება – რეალური პროცესის შეცვლა ფიზიკური ან მათემატიკური მოდელით რისკების წინასწარი შეფასებისთვის.
- მეცნიერული ანალიზი და სინთეზი.

მეცნიერული ანალიზი – მოვლენის ან პროცესის დაშლა მის შემადგენელ ნაწილებად, რათა უკეთ გავიგოთ თითოეული ელემენტის თვისებები და ურთიერთკავშირი. მაგალითად, კონკრეტული ინციდენტის ანალიზი საშუალებას გვაძლევს დავინახოთ, რა ფაქტორებმა შეუწყო ხელი მის განვითარებას.

მეცნიერული სინთეზი – ანალიზის საპირისპირო პროცესია, როდესაც მიღებული მონაცემები და დაკვირვებები ერთიანდება საერთო სურათში. სინთეზის საშუალებით სხვადასხვა წყაროდან მიღებული ინფორმაცია ინტეგრირდება და იძლევა გადაწყვეტილებების მიღების საშუალებას.

მეცნიერული ანალიზი წარმოადგენს ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს კვლევის მეთოდს, რომელიც უზრუნველყოფს როგორც თეორიულ, ისე პრაქტიკულ საკითხების სიღრმისეულ შეფასებას. მისი საშუალებით შესაძლებელია რთული პროცესებისა და მოვლენების დეტალური სტრუქტურიზაცია, კანონზომიერებების გამოვლენა და ისეთი დასკვნების ჩამოყალიბება, რომლებიც ემყარება მკაფიო ლოგიკურ და ემპირიულ საფუძვლებს. აღნიშნული მეთოდი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია შრომის უსაფრთხოების სფეროში, რადგან სწორედ მეცნიერული ანალიზი ქმნის საფუძველს რეალისტური რისკების იდენტიფიცირებისა და მათი ეფექტიანი მართვისათვის. იგი არა მხოლოდ აკადემიურ სიღრმეს ანიჭებს კვლევას, არამედ პრაქტიკულ დონეზეც უზრუნველყოფს რეკომენდაციების სანდოობასა და გამოყენებადობას.

მეცნიერული ანალიზი საშუალებას იძლევა რომ მოხდეს არა მხოლოდ ფაქტობრივი მონაცემების სისტემატიზაცია, არამედ მრავალფაქტორული რისკების გამოვლენა, მათი რაოდენობრივი და ხარისხობრივი შეფასება და პროგნოზირება. შესაბამისად,

მეცნიერული ანალიზი წარმოადგენს არა დამხმარე, არამედ ფუნდამენტურ ინსტრუმენტს, რომლის გარეშეც შეუძლებელია შრომის უსაფრთხოების თანამედროვე სტანდარტების ჩამოყალიბება და სრულყოფა.

პროფესიულ უსაფრთხოებაში კვლევის მეთოდები მოიცავს როგორც რაოდენობრივ, ისე ხარისხობრივ მიდგომებს, რათა შეფასდეს რისკები, ქცევები, და უსაფრთხოების პოლიტიკის ეფექტიანობა. დეტალურად განვიხილოთ მეცნიერული მეთოდები, რომლებიც ყველაზე ხშირად გამოიყენება პროფესიულ უსაფრთხოებაში და აგრეთვე შევხვით მათი გამოყენების მიზნებს.

2.4. რაოდენობრივი მეთოდები

ეს მეთოდები ემყარება სტატისტიკურ მონაცემებს და გამოიყენება რისკების, ინციდენტების სიხშირისა და უსაფრთხოების პოლიტიკის ეფექტიანობის შესაფასებლად. რაოდენობრივი მეთოდების სახეობებია:

- **გამოკითხვები და კითხვარები**
გამოიყენება უსაფრთხოების საკითხებზე დასაქმებულთა ცოდნის, დამოკიდებულებების და ქცევების შესაფასებლად.
- **სტატისტიკური ანალიზი**
ინციდენტების, ავარიების, და პროფესიული დაავადებების მონაცემების ანალიზი, რათა გამოვლინდეს ტენდენციები და რისკ-ფაქტორები.
- **მონიტორინგი და გაზომვები**
გარემოს პირობების (მაგ., ტემპერატურის, ხმაურის, ტოქსიკური ნივთიერებების კონცენტრაციის) რეგისტრაცია სპეციალური საზომი მოწყობილობებით.

2.5. ხარისხობრივი მეთოდები

ხარისხობრივი მიდგომები ფოკუსირდება ადამიანურ ფაქტორებზე, ქცევებზე და ორგანიზაციულ კულტურაზე.

- **ინტერვიუები და ფოკუს-ჯგუფები**
ღრმა ინფორმაციის მიღება დასაქმებულების გამოცდილებაზე, აღქმაზე და უსაფრთხოების კულტურაზე.
- **დაკვირვება სამუშაო პროცესზე**
რეალურ სამუშაო გარემოში ქცევების და პროცედურების შეფასება, რათა გამოვლინდეს შესაძლო საფრთხეები.
- **შემთხვევის ანალიზი**
კონკრეტული ინციდენტის დეტალური შესწავლა, რათა გაირკვეს მიზეზები და შემუშავდეს პრევენციული ზომები.

2.6. შერეული მეთოდები

როდესაც რაოდენობრივი და ხარისხობრივი მიდგომები კომბინირდება, კვლევა ხდება უფრო კომპლექსური და სიღრმისეული.

- მაგალითად, ინციდენტების სტატისტიკური ანალიზის შემდეგ შეიძლება ჩატარდეს ინტერვიუები, რათა გაირკვეს ქცევითი მიზეზები.

2.7. მეთოდოლოგიური რუკა

ქვემოთ მოცემულ 2.1. ცხრილში წარმოდგენილია მეთოდოლოგიური რუკა კვლევის მეთოდების გამოყენების პრიორიტეტების შესახებ.

ცხრილი 2.1. კვლევის მეთოდების გამოყენების პრიორიტეტები

მეთოდი	გამოყენება
დაკვირვება	ერგონომიული, ქცევითი რისკები
სტატისტიკური ანალიზი	ინციდენტების სიხშირე, ტენდენციები
მოდელირება	ფიზიკური, ქიმიური რისკების პროგნოზი
ინტერვიუ	ფსიქო-სოციალური, ორგანიზაციული რისკები

კვლევის სანდოობის გასაზრდელად ხშირად გამოიყენება ტრიანგულაცია, რომელიც განისაზღვრება როგორც მეთოდების კომბინაცია ერთი და იმავე ფენომენის შესწავლის პროცესში, ანუ მონაცემების გადამოწმება სხვადასხვა მეთოდით (მაგ. დაკვირვება + ინტერვიუ + სტატისტიკა), რაც იძლევა უფრო ობიექტურ და მრავალმხრივ სურათს.

ამგვარად, ტრიანგულაცია გულისხმობს ერთი და იმავე ფენომენის შესწავლას სხვადასხვა მეთოდით, რათა მიღებული შედეგები იყოს უფრო ობიექტური, სანდო და მრავალმხრივი. აი, კონკრეტული მაგალითი პროფესიული უსაფრთხოების კონტექსტში.

ქიმიური რისკების შეფასება ლაბორატორიაში

- დაკვირვება: უსაფრთხოების სპეციალისტი რეალურ სამუშაო პროცესში აკვირდება პერსონალის ქცევებს — იყენებენ თუ არა დამცავ აღჭურვილობას, როგორ ინახავენ ქიმიურ ნივთიერებებს.

- ინტერვიუები: პერსონალთან ჩატარდება დაწვრილებითი ინტერვიუები, რათა გაირკვეს მათი აღქმა და დამოკიდებულება ქიმიური რისკების მიმართ.

- სტატისტიკური ანალიზი: განიხილება ინციდენტების ისტორია — რამდენჯერ დაფიქსირდა ქიმიური ნივთიერებების გაჟონვა, მოწამვლა ან სხვა შემთხვევა.

2.8. პროფესიული უსაფრთხოების კვლევის მეთოდები

რისკების ტიპოლოგია

ჯანდაცვა და სამთო სამუშაოები რადიკალურად განსხვავდება ერთმანეთისაგან, მაგრამ პროფესიული უსაფრთხოების კვლევისას შეგვიძლია მათ შორის საერთო ნიშნების პოვნა და სისტემური ანალიზის განხორციელება. ქვემოთ მოცემულ ცხრილში 2.2, ტიპიზებულია რისკები და გამოვლენილია საერთო ნიშნები ჯანდაცვასა და სამთო სამუშაოებს შორის. ადვილი მისახვედრია, რომ აღნიშნულ ცხრილზე შესაძლებელია ერთი ან რამდენიმე სვეტის დამატება სხვადასხვა დარგებისათვის, რომლებიც რისკების იმავე კატეგორიით და ზიანის ანალოგიური შედეგებით დახასიათდებიან. ცხრილში რისკები დახარისხებული და გაერთიანებულია სტრუქტურირებულად. ნაბიჯ-ნაბიჯ შევისწავლოთ თუ როგორ უნდა განხორციელდეს აღნიშნული.

ცხრილი 2.2. რისკების ტიპოლოგია: ჯანდაცვა და სამთამადნო სამუშაოები

კატეგორია	ჯანდაცვა	სამთო სამუშაოები	საერთო ნიშანი
ფიზიკური რისკები	ნემსის ჩხვლეტა, დაცემა, გადაღლა	აფეთქება, ჩამონგრევა, მძიმე ტექნიკის ზემოქმედება	სხეულის დაზიანება, დასუსტება, დაცემის საფრთხე
ქიმიური რისკები	სადეზინფექციო ნივთიერებები, მედიკამენტები	მტვერი, გაზები, ფეთქებადი ნივთიერებები	ტოქსიკური ზემოქმედება, სუნთქვის გაძნელება
ბიოლოგიური რისკები	ინფექციები, ვირუსები	ბაქტერიები, ბუნებრივი მიკროორგანიზმები	მიკრობიოლოგიური ზემოქმედება
ფსიქო-სოციალური რისკები	სტრესი, ემოციური გადატვირთვა	იზოლაცია, სტრესი, სამუშაოს ინტენსივობა	ფსიქოლოგიური ზეწოლა, სტრესული გარემო
ერგონომიული რისკები	არასწორი პოზა, განმეორებადი მოძრაობები	მძიმე ფიზიკური დატვირთვა, არასწორი პოზიციები	გადაღლა, კუნთების, ხერხემლის დაზიანება
ტექნიკური/მექანიკური რისკები	სამედიცინო მოწყობილობები ს გაუმართაობა	ტექნიკის მწყობრიდან გამოსვლა	ტექნიკური გაუმართაობით

			გამოწვეული საფრთხე
--	--	--	-----------------------

ჩვენ დამატებით კიდევ შეგვეძლო საერთო რისკების მითითება, რომელთა შორის აღსანიშნავია: ფინანსური რისკები, ორგანიზაციული რისკები, ინფორმაციული რისკები, იურიდიულ-ეთიკური რისკები, კულტურული რისკები და ა.შ. უკვე ისედაც ცხადი გახდა, რომ ამ ორ ერთმანეთისაგან გამიჯნულ დარგს რისკების იდენტიფიკაციის ერთნაირი მაჩვენებლები აქვთ პრაქტიკულად.

შესაბამისად, პროფესიული უსაფრთხოებისა და მისი კვლევის მეთოდების შესწავლა შესაძლებელი უნდა იყოს დარგობრივი დაყოფის პრინციპის მხედველობაში მიღების გარეშეც. უფრო ზუსტად, შესაძლებელი უნდა იყოს სწავლება რომელიმე დარგის მაგალითზე. შესწავლის შემდეგ კი ეჭვგარეშა ისეთ რისკებზეც გავამახვილოთ ყურადღება და გავაანალიზოთ კვლევის იმავე მეთოდებით, რასაც გამოვიყენებთ დარგთაშორისი, ანუ საერთო გამაერთიანებელი რისკების შემთხვევაში.

ფუნქციური კლასიფიკაცია

რისკები უნდა შეფასდეს არა წარმოების სფეროს მიხედვით, არამედ მათი ტიპისა და ფუნქციის ან მოქმედების მიხედვით (ფიზიკური, ქიმიური, ფსიქოლოგიური და ა.შ.) 2.2 ცხრილის ანალოგიურად. ეს უნივერსალური მოდელის შექმნის საშუალებას იძლევა, რომელიც შესაძლებელია ადამიანის მოღვაწეობის სხვადასხვა სფეროზე გავრცელდეს.

2.9. უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსი

შესაძლებელია შემუშავდეს **უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსი**, რომელიც აერთიანებს სხვადასხვა ტიპის რისკებს ერთიან მაჩვენებელში - ჯამური ციფრის სახით. ეს ინდექსი გამოიყენება როგორც შედარებისთვის, ისე პროგნოზისთვის სხვადასხვა სფეროში.

უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსის სტრუქტურის გასააზრებლად დავუშვათ, რომ გვაქვს იმავე კატეგორიის რისკები, რაც 2.2 ცხრილში. ჯერ განვიხილავთ მხოლოდ ჯანდაცვის შემთხვევას. ცხრილი აჩვენებს, თუ როგორ შეიძლება სხვადასხვა ტიპის რისკების სიხშირე და წონა გაერთიანდეს ერთიან მაჩვენებელში.

ცხრილი 2.3. უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსი ჯანდაცვისათვის

რისკების კატეგორია	სიხშირე 0-10 სკალით, R_i	წონა 0-1 სკალით w_i , ერთის ნაწილებში	$R_i * w_i$
ფიზიკური რისკები	7	0.25	1.75

ქიმიური რისკები	5	0.20	1.00
ბიოლოგიური რისკები	9	0.30	2.70
ფსიქო-სოციალური რისკები	6	0.15	0.90
ერგონომიული რისკები	4	0.05	0.20
ტექნიკური/მექანიკური რისკები	3	0.05	0.15

პირველ სვეტში რისკები დახარისხებული და გაერთიანებულია მათი მოქმედების მიხედვით, სტრუქტურირებულიად.

მეორე სვეტში მოცემულია ინციდენტების სიხშირე 0-10 სკალის მიხედვით. ეს სკალა პირობითია და მისი გამოყენება დამოკიდებულია კონტექსტზე. აბსოლუტური სკალა - 10 ნიშნავს მაქსიმალურ შესაძლო რისკს (მაგ., სიკვდილიანობა, სისტემური კოლაფსი). შედარებითი სკალა - 10 ნიშნავს ყველაზე მაღალი რისკს მოცემულ გარემოში (მაგ. კონკრეტულ კლინიკაში ან საბადოზე). მეორე სვეტში მოცემულია სტატისტიკურ ან სხვა ობიექტურ მონაცემებზე დაფუძნებული სიხშირეები. მაგალითად, შესაძლებელია ეს იყოს საშუალო წლიური მონაცემები, წლიური მაქსიმუმები, ხუთწლიანი საშუალო, ან წლიური მაქსიმუმი, მაგალითად 2000-2025 წლების პერიოდში და ა.შ., ანუ ნებისმიერი პერიოდის ობიექტური მაჩვენებლები. რისკების სიხშირის შედარებითი ანალიზი მოცემულია 2.7 ცხრილში, რომლის მხედველობაში მიღება ყოველთვის საჭიროა.

მესამე სვეტში მოცემულია ექსპერტების მიერ განსაზღვრული წონა. ამ სვეტში შესაძლებელია აგრეთვე ექსპერტული წონის მაგივრად იყოს მონაცემებზე დაფუძნებული წონა, ანუ წონა რომელიც განისაზღვრება თვითონ რისკის სიხშირის რიცხვითი მნიშვნელობებით (მეორე სვეტის მონაცემების მიხედვით) შემდეგი ფორმულით

$$w_i = \frac{R_i}{\sum_{j=1}^n R_j} \quad (2.1)$$

სადაც R_i არის კონკრეტული ტიპის რისკის ინციდენტების სიხშირე; w_i — შესაბამისი წონა; $\sum_{j=1}^n R_j$ - ყველა ინციდენტის ჯამური სიხშირე. მონაცემებზე დაფუძნებულ წონაში იგულისხმება, რომ გვაქვს ინციდენტების სტატისტიკა, ან სხვა ობიექტური მონაცემები ინციდენტების განმეორებადობის (სიხშირის) შესახებ, რომლის მიხედვითაც მოხდა წონის გაანგარიშება. აღსანიშნავია, რომ დარგის სპეციფიკა ყველაზე უფრო მეტად ვლინდება წონის მაჩვენებელში.

მეოთხე სვეტში მოცემულია უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსი, რომელიც იანგარიშება ფორმულით

$$SII = \sum_{i=1}^n R_i \cdot W_i \quad (2.2)$$

სადაც SII არის უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსი; R_i — რისკის სიხშირე (0–10); W_i — რისკის წონა (0–1).

უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსის ჯამური მაჩვენებელი $SII = 6.70$ მიუთითებს, რომ ჯანდაცვის სფეროში რისკების საერთო დონე საშუალოზე მაღალია.

უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსი, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას:

- სხვადასხვა კლინიკის ერთმანეთთან შედარებისთვის.
- პრევენციული პოლიტიკის ეფექტიანობის ანალიზისთვის.
- დარგთაშორისი შედარებისთვის (მაგ. სამთო სამუშაოებთან).
- პროგნოზირებისთვის (რისკების ზრდის ან შემცირების ტენდენციების შეფასება).
- პრიორიტეტების განსაზღვრისთვის (რომელი კატეგორია მოითხოვს უფრო აქტიურ მართვას).

როგორც აღინიშნა, მესამე სვეტში გვაქვს ექსპერტული წონა, რომელიც შეიძლება განისაზღვროს: დარგის სპეციფიკის მიხედვით, პრიორიტეტების მიხედვით, პოლიტიკის ან სტანდარტების მიხედვით. ორივე წონა მონაცემებზე დაფუძნებული და ექსპერტული სწორია, უბრალოდ ემსახურება სხვადასხვა მიზანს. მონაცემზე დაფუძნებული წონა საჭიროა ობიექტური შეფასებისთვის. ექსპერტული წონა — პოლიტიკის ან პრევენციის ფოკუსისთვის, შესაძლებელია ორივეს გამოყენება შედეგების შესადარებლად.

უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსი სამთო დარგისათვის მოცემულია 2.4 ცხრილში, რომელიც არის ჯანდაცვის პირობებისათვის შედგენილი 2.3 ცხრილის ანალოგია.

ცხრილი 2.4. უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსი სამთო დარგისათვის

რისკების კატეგორია	სიხშირე 0-10 სკალით, R_i	წონა 0-1 სკალით w_i , ერთის ნაწილებში	$R_i * w_i$
ფიზიკური რისკები	8	0.30	2.40
ქიმიური რისკები	6	0.20	1.20
ბიოლოგიური რისკები	3	0.10	0.30
ფსიქო-სოციალური რისკები	5	0.15	0.75
ერგონომიული რისკები	7	0.15	1.05
ტექნიკური/მექანიკური რისკები	6	0.10	0.60

ცხადია, რომ 2.3 და 2.4 ცხრილების მიხედვით შეგვიძლია ვიმსჯელოთ უსაფრთხოების ინტეგრირებული (ჯამური) ინდექსის სიდიდეზე განხილული ორი დარგის მიხედვით, აგრეთვე შევაფასოთ და ერთმანეთს შევადაროთ რისკების ცალკეული კატეგორიის გავლენა სათანადო ინდექსის მიხედვით.

დამატებითი მოსაზრებები წონებთან დაკავშირებით: ექსპერტული წონები რატომ შემოვიტანეთ მაშინ, როცა ხელთ გვაქვს ობიექტური სტატისტიკური მონაცემების მიხედვით ნაანგარიშები, რომლებიც თითქოსდა უფრო შესაბამისი უნდა იყოს. საქმე ის არის, რომ:

1. მონაცემები არ არის სრული რეალობა.

ისტორიული მონაცემები ასახავს მომხდარს, მაგრამ არა შესაძლებელს. მაგალითად, თუ კლინიკაში არ დაფიქსირებულა ტექნიკური ავარია, მისი წონა იქნება 0 — თუმცა ეს არ ნიშნავს, რომ ანალოგიური რისკი არ არსებობს. ექსპერტი ხედავს პოტენციურ საფრთხეს, რომელიც ჯერ არ რეალიზებულა. ამიტომ ექსპერტის მიერ განსაზღვრული წონა მნიშვნელოვანია.

2. მონაცემები შეიძლება იყოს არასაკმარისი ან დამახინჯებული.

მცირე კლინიკაში ინციდენტების რაოდენობა დაბალია, მაგრამ რისკი მაინც მაღალია. ზოგჯერ მონაცემები არ არის სტანდარტულად აღრიცხული (მაგალითად, ფსიქო-სოციალური ზეწოლა ხშირად არ ფიქსირდება). ექსპერტი ავსებს იმ სიცარიელეს, რასაც სტატისტიკა ვერ ასახავს. ექსპერტს აქვს შესაძლებლობა შეფასებაში შემოიტანოს ე.წ. **სუბიექტური კორექტორი**.

3. სტრატეგიული პრიორიტეტები.

ორგანიზაციამ შეიძლება გადაწყვიტოს, რომ ერგონომიული რისკები უნდა იყოს პრიორიტეტული, მიუხედავად იმისა, რომ სტატისტიკურად ნაკლები ინციდენტია და მისი წონა შედარებით ნაკლებია.

ექსპერტული წონა ასახავს პოლიტიკას, ან პრევენციულ ფოკუსს და სტრატეგიულ ხედვას.

4. მულტიკრიტერიული შეფასება.

მონაცემები ხშირად მხოლოდ „სიხშირეს“ ასახავს. ექსპერტი კი აფასებს: სიხშირეს, სიმძიმეს, გამოვლენის სირთულეს, პრევენციის შესაძლებლობას.

ანალოგიური კომპლექსური ხედვა მხოლოდ ექსპერტს აქვს. ამიტომ ექსპერტული და მონაცემზე დაფუძნებული წონები კი არ ეჯიბრებიან, არამედ ავსებენ ერთმანეთს.

2.10. გავლენის ერთიანი ინდექსი

უსაფრთხოების ინტეგრირებულ (ჯამურ) ინდექსთან SII ერთად სამეცნიერო მიმოქცევაშია გავლენის ერთიანი ინდექსი UII , რომელიც იანგარიშება ფორმულით

$$UII_i = R_i \cdot W_i \quad (2.3)$$

სადაც UII_i არის გავლენის ერთიანი ინდექსი ცალკეული რისკისათვის.

აღნიშნული ინდექსების შინაარსისა და დანიშნულების ერთმანეთისაგან გასამიჯნად სასარგებლოა 2.5 ცხრილი.

ცხრილი 2.5. განსხვავება ჯამურ და გავლენის ინდექსებს შორის

მახასიათებელი	გავლენის ერთიანი ინდექსი UII_i	ჯამური ინდექსი SII
შინაარსი	აერთიანებს რისკის სიხშირეს და წონას თითოეული კატეგორიისთვის	ყველა კატეგორიის $R_i * W_i$ ჯამი
საანგარიშო ფორმულა	$UII_i = R_i * W_i$	$SII = \sum_{i=1}^n R_i * W_i$
დანიშნულება	თითოეული რისკის კატეგორიის გავლენის შეფასება	სისტემური რისკის საერთო მაჩვენებელი
გამოყენება	კატეგორიების შედარება, პრიორიტეტების განსაზღვრა	დარგთაშორისი შედარება, პროგნოზირება, სტრატეგიული ანალიზი
მაგალითი	ბიოლოგიური რისკი: $UII = 9 * 0.3 = 2.7$	ყველა UII -ის ჯამი $SII = 6.70$

მენიშვნა: თითოეული რისკის კატეგორიის გავლენა გამოითვლება როგორც UII — გავლენის ერთიანი ინდექსი, რომელიც წარმოადგენს სიხშირისა და წონის ნამრავლს. ხოლო ყველა კატეგორიის UII -ის ჯამი ქმნის ჯამურ ინდექსს SII , რომელიც გამოიყენება სისტემური რისკის საერთო დონის შესაფასებლად.

უსაფრთხოების ინტეგრირებული (ჯამური) ინდექსის SII -ის ცვალებადობის დიაპაზონის ინტერპრეტაცია მოცემულია 2.6 ცხრილში, რომელიც უნდა შევაფასოთ როგორც სამოქმედო ცხრილი.

ცხრილი 2.6. უსაფრთხოების ინტეგრირებული (ჯამური) ინდექსის ინტერპრეტაცია

SII -ის მნიშვნელობა	ინტერპრეტაცია
0-3	დაბალი სისტემური რისკი
3-6	ზომიერი რისკი, საჭიროა მონიტორინგი
6-8	მაღალი რისკი, აუცილებელია ჩარევა
8-10	კრიტიკული რისკი, დაუყოვნებელი რეაგირება

ერთხელ კიდევ ვუბრუნდებით რისკების სიხშირესა და 0-10 სკალას. როდესაც ხელთ გვაქვს რაოდენობრივი მონაცემები, მაშინ ვადგენთ შემთხვევათა მაქსიმალურ რიცხვს. მაგალითად, გვაქვს 5 ტოქსიკური გაჟონვის შემთხვევა, რომელიც არის მაქსიმუმი ყველა სხვა მომხდარ შემთხვევას შორის. 0-10 სკალის პირობებში 5 ტოქსიკური გაჟონვის შემთხვევა ფასდება 10 ქულით. სხვა რისკების შემთხვევები პროპორციულად გადაგვყავს 0–10 სკალაზე, სადაც მაქსიმუმი უდრის 10 ქულას, ხოლო ყოველი ინციდენტი ფასდება 2 ქულით. აღნიშნული მიდგომა ქმნის რიცხვითად გამყარებულ რისკის ქულებს. ადვილი

მისახვედრია, რომ სკალის „მგრძნობელობის“ და შედეგების სიზუსტის ინტერესებიდან გამომდინარე, შესაძლებელია სხვა მასშტაბის სკალით სარგებლობა

როდესაც არ გვაქვს რაოდენობრივი მონაცემები, მაშინ ვიყენებთ ექსპერტულ შეფასებას, რათა განვსაზღვროთ შესაძლო მაქსიმუმი. მაგალითად, “ამ ადგილზე ან ამ პროცესში მოსალოდნელია მაქსიმუმ 3 ბიოლოგიური რისკი”. ან პირდაპირი შეფასება 0–10 სკალაზე თითოეული რისკისთვის ექსპერტის მიერ. შესაძლებელია რამდენიმე ექსპერტმა შეაფასოს რისკი და ცხრილში შეტანილი იქნეს რისკების სიხშირის საშუალო მნიშვნელობები.

რისკების სიხშირის განსაზღვრის წყაროების შედარებითი ანალიზი მოცემულია 2.7 ცხრილში.

ცხრილი 2.7. რისკების სიხშირის შედარებითი ანალიზი

მეთოდი	აღწერა	უპირატესობა	ნაკლი
სტატისტიკური	ისტორიული მონაცემები	ობიექტურობა	ზოგჯერ არასაკმარისია
პროგნოზული	მოდელირება, სიმულაცია	სცენარებზე მორგებული	დამოკიდებულია ვარაუდებზე
ექსპერტული	ინტერვიუები, ფოკუს-ჯგუფები	კონტექსტური სიღრმე	სუბიექტურობა

რისკის სიხშირის შეფასება, თუნდაც რაოდენობრივ მონაცემებზე დაყრდნობით, ყოველთვის შეიცავს მიახლოებითობას, რადგან:

- შემთხვევების რაოდენობის სიზუსტე ვერ განსაზღვრავს საფრთხის ზუსტ დონეს, რადგან მაგალითად, 5 ტოქსიკური გაჟონვა შეიძლება იყოს მცირე მასშტაბის, ხოლო სხვა ერთი შემთხვევა იყოს კატასტროფული მასშტაბის.
- მონაცემები ხშირად არასრულია — ბევრი რისკი არ ფიქსირდება ან არ აღირიცხება დროულად, ან მიჩემალულია რაიმე მიზეზით.
- ექსპერტული შეფასება სუბიექტურია — დამოკიდებულია გამოცდილებაზე, აღქმაზე, კონტექსტზე.
- თვით სკალის არჩევა (მაგალითად, 0–10) თვითონაც შემთხვევითია და არ არის აბსოლუტური.

აქ ბუნებრივად ისმის კითხვა - როგორ ვმართოთ ეს მიახლოებითობა პრაქტიკულად? აღნიშნულის პასუხი შემდეგია, რაც ყოველთვის უნდა გვქონდეს მხედველობაში:

1. გამჭვირვალობა — ყოველთვის საჭიროა მითითება, რომ შეფასება ეფუძნება მოდელირებულ ან ექსპერტულ მონაცემებს.
2. ინდექსის მგრძნობელობის ანალიზი — ინდექსის სხვადასხვა სცენარის გამოცდა (0-10), (0-8) და ა.შ., ინდექსის მგრძნობელობის დაზუსტება და ოპტიმალურის შერჩევა.

3. ინტერვალებით მუშაობა — რაც ნიშნავს, საშუალო, მინიმალური, მაქსიმალური ან (საშუალო $\pm$ სტანდარტული გადახრა) სიდიდეებით ოპერირებას.

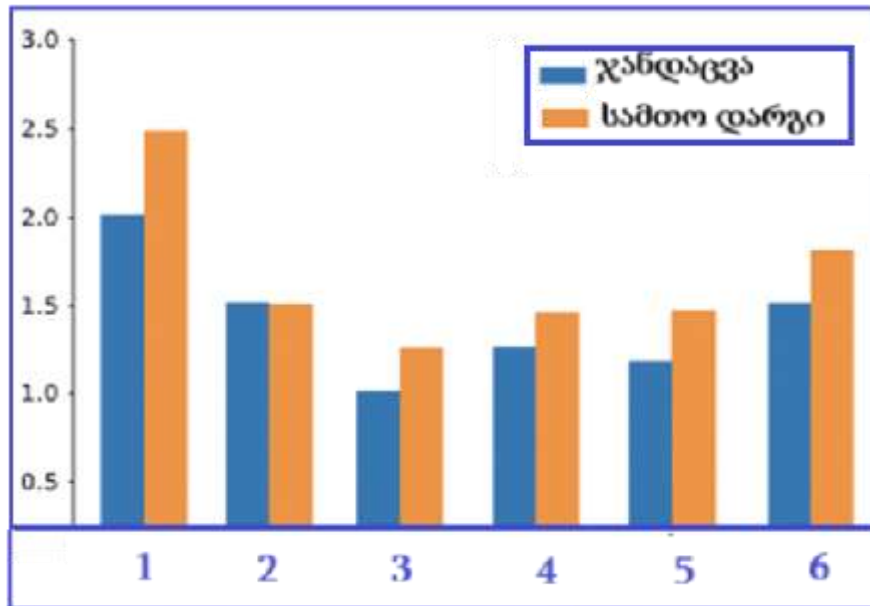
4. დოკუმენტირება — აღწერე, როგორ განისაზღვრა მაქსიმუმი, რა წყაროებზე დაყრდნობით.

მთავარი ისაა, რომ მოდელი არ არის რეალობა, ის არის რეალობის ანალიტიკური ანარეკლი — და მისი ღირებულება იზომება იმით, რამდენად კარგად ეხმარება საჭირო გადაწყვეტილების მიღებას, მიუხედავად მიახლოებითობისა. ამგვარად, ექსპერტულად შესაძლებელია განისაზღვროს როგორც რისკის სიხშირე, ისე მათი წონა. აღნიშნული კი ემსახურება ლეგიტიმურ მიზნებს. ილუსტრაციისათვის ექსპერტულად განსაზღვრული წონები შეტანილია 2.8 ცხრილში.

ცხრილი 2.8. ექსპერტების მიერ განსაზღვრული წონების ილუსტრაცია

კატეგორია	წონა სამთო სამუშაოებში	წონა ჯანდაცვაში
ფიზიკური რისკები	0.30	0.15
ქიმიური რისკები	0.20	0.25
ბიოლოგიური რისკები	0.10	0.30
ფსიქო-სოციალური რისკები	0.10	0.15
ერგონომიული რისკები	0.10	0.05
ტექნიკური/მექანიკური რისკები	0.20	0.10
ჯამი	1.0	1.0

წარმოდგენილი მეთოდოლოგია და ინდექსური მოდელი ქმნის საფუძველს პროფესიული უსაფრთხოების სისტემური ანალიზისთვის, რაც შესაძლებელს ხდის როგორც დარგთაშორის შედარებას, ისე კონკრეტული რისკების პრიორიტიზაციას და მართვას. ქვემოთ მოცემულია ფიგ. 2.1, რომელიც უჩვენებს თუ როგორია რისკების კატეგორიების წვლილი უსაფრთხოების ინტეგრირებულ ინდექსში ორ სხვადასხვა დარგში - ჯანდაცვასა და სამთო სამუშაოებში.



ფიგ. 2.1. უსაფრთხოების ინტეგრირებული ინდექსის ცვალებადობა ჯანდაცვასა და სამთო სამუშაოებში რისკების მიხედვით: 1- ფიზიკური; 2 - ქიმიური; 3 - ბიოლოგიური; 4 - ფსიქო-სოციალური; 5 - ერგონომიული; 6 - ტექნიკური/მექანიკური

2.11. რისკებზე დაფუძნებული აზროვნება

რისკზე დაფუძნებული აზროვნება წარმოადგენს თანამედროვე მენეჯმენტის ერთ-ერთ ფუნდამენტურ პრინციპს, რომელიც პრევენციულ მიდგომას ემყარება და ორგანიზაციას შესაძლებლობას აძლევს წინასწარ განსაზღვროს პოტენციური საფრთხეები და შესაბამისად მოემზადოს მათ შესამცირებლად ან თავიდან ასაცილებლად.

ჯანდაცვაში რისკი განიმარტება როგორც ნებისმიერი პოტენციური საფრთხე, რომელმაც შეიძლება გამოიწვიოს: პაციენტის ჯანმრთელობის დაზიანება, სამედიცინო პერსონალზე ფიზიკური ან ფსიქოლოგიური ზეწოლა, დაწესებულების ფუნქციური, ფინანსური ან რეპუტაციული ზიანი.

ძირითადი რისკ-კატეგორიები:

- **კლინიკური რისკები:** არასწორი დიაგნოზი, მედიკამენტების დოზირების შეცდომა, ინფექციების გავრცელება.
- **ფიზიკური რისკები:** დაცემა, ტექნიკის გაუმართაობა, რადიაციული ზემოქმედება.
- **ფსიქო-სოციალური რისკები:** სტრესი, გადაღლა, ბულინგი სამუშაო გარემოში.
- **ტექნოლოგიური რისკები:** მონაცემთა გაჟონვა, სისტემური ხარვეზები, AI-ის არასწორი რეკომენდაციები.

- **ორგანიზაციული რისკები:** რესურსების არასწორი განაწილება, კომუნიკაციის ჩავარდნა, კრიზისული მართვის ნაკლებობა.

2.12. ISO 31000 — რისკების მართვის სტანდარტი

ISO 31000:2018 წარმოადგენს საერთაშორისოდ აღიარებულ სტანდარტს, რომელიც უზრუნველყოფს ზოგად წესებსა და რეკომენდაციებს ორგანიზაციული რისკების მართვისთვის. მისი ძირითადი მახასიათებლებია:

- რისკის იდენტიფიკაცია, ანალიზი და შეფასება.
- კონტექსტზე მორგებული მიდგომა.
- ინტეგრირება ორგანიზაციულ პროცესებში.
- განმეორებადი გადახედვა და გაუმჯობესება.

ISO 31000 ხელს უწყობს ორგანიზაციის გამძლეობას, სტრატეგიული მიზნების მიღწევას და პროცესების უწყვეტ გაუმჯობესებას. იგი არ განსაზღვრავს სერტიფიცირების მოთხოვნებს, არამედ წარმოადგენს ჩარჩოს, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას ნებისმიერი ტიპისა და ზომის ორგანიზაციის მიერ.

2.13. ISO 45001 — შრომის უსაფრთხოება და ჯანმრთელობა

ISO 45001:2018 არის სამუშაო გარემოს უსაფრთხოების მართვის საერთაშორისო სტანდარტი. ის განსაკუთრებულ ყურადღებას ამახვილებს შრომის უსაფრთხოების რისკების შეფასებაზე და პრევენციულ ზომებზე. მისი ძირითადი პრინციპებია:

- სისტემური მიდგომა შრომის უსაფრთხოების რისკებზე.
- თანამშრომელთა ჩართულობა და კონსულტაცია.
- პროცესების მონიტორინგი და გაუმჯობესება.
- დამსაქმებლის პასუხისმგებლობა და სამართლებრივი შესაბამისობა.

ISO 45001 პირდაპირ ითვალისწინებს რისკებზე დაფუძნებული აზროვნების კონცეფციას, რაც გულისხმობს ორგანიზაციის ვალდებულებას, იდენტიფიცირება მოახდინოს არა მხოლოდ არსებული, არამედ პოტენციური რისკებისაც და შეიმუშაოს პრევენციული პოლიტიკა.

2.14. რისკზე დაფუძნებული აზროვნება პრაქტიკაში

რისკზე დაფუძნებული აზროვნება გულისხმობს შემდეგს:

- პრობლემების წინასწარ აღმოჩენა და არა რეაგირება უკვე მომხდარ შედეგებზე.
- გადაწყვეტილებების მიღება დამტკიცებულ ინფორმაციაზე დაყრდნობით.
- პროცესების მუდმივი გაძლიერება და გაუმჯობესება.

- ორგანიზაციული მიზნების მისაღწევად რეგულარული ანალიზი და სწრაფი ადაპტაცია.

ეს მიდგომა საშუალებას აძლევს ორგანიზაციებს, გახდნენ უფრო მოქნილები, შეამცირონ ხარჯები, გაზარდონ პერსონალის მოტივაცია და მოახდინონ საზოგადოების ნდობის კონსოლიდაცია.

ჯანდაცვის სექტორში რისკების მართვა წარმოადგენს სტრატეგიულ და სისტემატურ პროცესს, რომელიც მიმართულია პაციენტების, სამედიცინო პერსონალისა და ორგანიზაციის უსაფრთხოების უზრუნველყოფისკენ. ეფექტური რისკ-მენეჯმენტის მიზანია არა მხოლოდ ზიანის შემცირება, არამედ უსაფრთხოების კულტურის ჩამოყალიბება ორგანიზაციის ყველა დონეზე.

2.15. ტექნოლოგიური პროცესები და რისკის მართვა ჯანდაცვაში

თანამედროვე ჯანდაცვა სულ უფრო მეტად ეყრდნობა ტექნოლოგიურ სისტემებს — რაც ქმნის როგორც ახალ შესაძლებლობებს, ისე ახალ საფრთხეებს:

- **AI დიაგნოსტიკა** — ზრდის სიზუსტეს, მაგრამ მოითხოვს ეთიკურ კონტროლს.
- **ელექტრონული სამედიცინო ჩანაწერები** — აუმჯობესებს წვდომას, მაგრამ ზრდის მონაცემთა უსაფრთხოების რისკს.
- **ტელემედიცინა** — აფართოებს მომსახურებას, თუმცა რთულდება პაციენტის რეალური მდგომარეობის შეფასება.

2.16. რისკის მართვის ინტეგრირებული მოდელი

შესაძლებელია შემუშავდეს **მულტიფაქტორული ინდექსი**, რომელიც აერთიანებს კლინიკურ, ტექნოლოგიურ და ორგანიზაციულ რისკებს:

$$HRI = w_1 \cdot R_{\text{კლინიკური}} + w_2 \cdot R_{\text{ტექნოლოგიური}} + w_3 \cdot R_{\text{ორგანიზაციული}}$$

სადაც w_i არის წონა, რომელიც ასახავს სფეროს (დარგის) სპეციფიკას; R_i — შესაბამისი რისკის შეფასება (0–10 სკალაზე). ინტეგრირებული რისკის მართვის მოდელის მონაცემები შეტანილია 2.9 ცხრილში.

ცხრილი 2.9. ინტეგრირებული რისკის მართვის მოდელის ილუსტრაცია

კატეგორია	სიხშირე 0-10 სკალით, R_i	წონა 0-1 სკალით w_i , ერთის ნაწილებში	HRI
კლინიკური	8.5	0.5	4.25
ტექნოლოგიური	6.0	0.3	1.80
ორგანიზაციული	7.0	0.2	1.40
ჯამი	21.5	1.0	$SII = 7.45$

დასკვნები 2.9 ცხრილის მიხედვით:

1. კლინიკური რისკი ყველაზე მაღალია როგორც რიცხვითი მნიშვნელობით (8.5), ისე წონით (0.5) და გავლენის ინდექსით (4.25).

2. თუ მეორე სვეტში 0-1 სკალით მოცემულ წონებს გადავიანგარიშებთ ფორმულით (1), მაშინ კლინიკური რისკისათვის წონა იქნება 0.395, ტექნოლოგიური რისკისათვის 0.279, ხოლო ორგანიზაციული რისკისათვის 0.326. შესაბამისად დავრწმუნდებით, რომ წონების სტრუქტურა ასახავს ექსპერტის მონაწილეობას მათ განსაზღვრაში.

2.17. შემაჯამებელი დასკვნა

პროფესიული უსაფრთხოების კვლევის მეთოდები ქმნის საფუძველს რისკების სისტემური ანალიზისა და მართვისათვის, რაც უზრუნველყოფს უსაფრთხოების სტანდარტების გაუმჯობესებას დარგობრივი სპეციფიკის მხედველობაში მიღების გარეშე. რაოდენობრივი და ხარისხობრივი მიდგომების კომბინაცია, ტრიანგულაციის გამოყენებით, იძლევა სანდო და მრავალმხრივ მონაცემებს. რისკების ტიპოლოგიის მაგალითზე ჩანს, რომ სხვადასხვა დარგს — ჯანდაცვას, სამთო სამუშაოებს — შეიძლება ჰქონდეთ საერთო რისკ-კატეგორიები, რაც შესაძლებელს ხდის უნივერსალური მეთოდოლოგიური ჩარჩოს შექმნას. ნაშრომი ხაზს უსვამს მეცნიერული ანალიზისა და სინთეზის მნიშვნელობას, როგორც თეორიული და პრაქტიკული საფუძვლის შემქმნელ ინსტრუმენტებს, რაც კრიტიკულია პროფესიული უსაფრთხოების თანამედროვე სტანდარტების ჩამოყალიბებისთვის.

უნივერსალური მეთოდოლოგიური ჩარჩოს შექმნის შესაძლებლობა არ უნდა გავიგოთ დარგობრივ თავისებურებებზე უარის თქმად. პრაქტიკული რეკომენდაციების შემუშავების ეტაპზე ყოველთვის შემოდის და მხედველობაში მისაღებია დარგობრივი სპეციფიკა და თავისებურებები.

3. უსაფრთხოება საავტომობილო გვირაბის ხანძრის პირობებში

3.1. მეთოდოლოგიური ჩარჩო და მისი აუცილებლობა

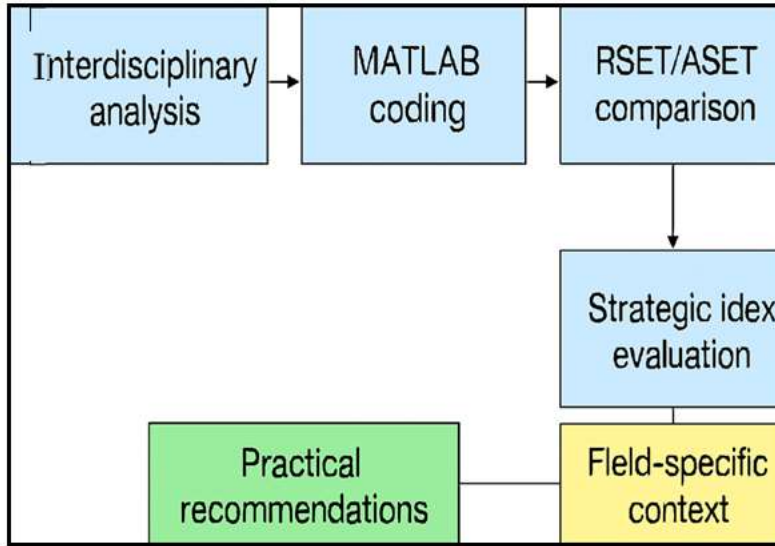
საგზაო გვირაბებში ხანძრები კრიტიკულ საფრთხეს უქმნის ადამიანის სიცოცხლეს, ინფრასტრუქტურის მთლიანობას და ეკონომიკურ სტაბილურობას. საქართველოს სატრანსპორტო ქსელში - განსაკუთრებით რიკოთის უღელტეხილის სისტემაში - ეს რისკები ძლიერდება მოძრაობის მაღალი სიმჭიდროვით და რთული ტოპოგრაფიული პირობებით. ასეთ ვითარებაში, პროფესიული უსაფრთხოებისადმი სტრუქტურირებული და სისტემური მიდგომის საჭიროება უმნიშვნელოვანესი ხდება.

წარმოდგენილი კვლევა გვირაბის გარემოში ხანძარსაწინააღმდეგო უსაფრთხოებას მულტიდისციპლინური ლიწილით აფასებს, რომელიც აერთიანებს გამოთვლით მოდელირებას, ევაკუაციის დინამიკას და სტრატეგიულ რისკების შეფასებას. CFD სიმულაციების, MATLAB-ზე დაფუძნებული დროის ანალიზისა და შედარებითი

ინდექსების გამოყენებით, კვლევის მიზანია ვენტილაციის დიზაინის, ევაკუაციის დაგეგმვისა და უსაფრთხოების სისტემის ოპტიმიზაციის ქმედითი რეკომენდაციების დამუშავება. მეთოდოლოგია შეესაბამება საერთაშორისო სტანდარტებს (NFPA 502, PIARC, ევროკავშირის დირექტივა 2004/54/EC) იგი ეფუძნება უნივერსალურ ჩარჩოს, რომელიც ადაპტირდება დარგის სპეციფიკასთან, აგრეთვე შეესაბამება საქართველოს სატრანსპორტო პოლიტიკას სრული მოცულობით და ამის გამო შედის საქართველოს სივრცული განვითარების მოდელში.

პროფესიული უსაფრთხოების კვლევის მეთოდები ქმნის რისკების სისტემური შეფასების საფუძველს. მათი გამოყენება აუცილებელია არა მხოლოდ თეორიული ანალიზისთვის, არამედ პრაქტიკული გადაწყვეტილებების სანდოობისა და ვალიდურობის უზრუნველსაყოფად. პრაქტიკა აჩვენებს, რომ სავენტილაციო სისტემის ეფექტიანობის შეფასება მხოლოდ აღწერით ან ოპერატიული რეაგირების მიხედვით არ არის საკმარისი. მაგალითად შესაძლებელია მოვიხმოთ სენ-გოტარდის გვირაბის ხანძრის ანალიზი. გაეროს 2002 წლის ანგარიშში (TRANS/AC.7/11) სენ-გოტარდის გვირაბის ხანძრის შეფასებისას ექსპერტთა ჯგუფმა ერთდროულად დააფიქსირა ორი ურთიერთგამომრიცხავი მტკიცება: პუნქტი 8: „ვენტილაცია მუშაობდა ეფექტურად“; პუნქტი 9: „11 ადამიანი დაიღუპა ტოქსიკური კვამლის ჩასუნთქვით“.

ეს წინააღმდეგობა ხაზს უსვამს მოდელირების, მონაცემთა ანალიზისა და ინდექსზე დაფუძნებული შედარების აუცილებლობას, რათა უზრუნველყოფილი იყოს ობიექტურობა და აღმოიფხვრას აღწერილობით შეფასებებში შეუსაბამობები. ასეთი წინააღმდეგობების თავიდან ასაცილებლად, მოცემული ნაშრომი ეფუძნება ჩვენს მიერ შემუშავებულ მეთოდოლოგიურ ჩარჩოს [27], რომელიც მოიცავს CFD მოდელირებას, MATLAB კოდირებას, RSET/ASET ანალიზს, სტრატეგიული ინდექსის შედარებას და ადამიანური ფაქტორის შეფასებას. გვირაბის ხანძრის შეფასების მეთოდოლოგიური სტრუქტურა ილუსტრირებულია ფიგ. 3.1-ზე, რომელიც აჩვენებს, თუ როგორ გადადის კვლევა ინტერდისციპლინარული ანალიზიდან დარგის სპეციფიკურ პრაქტიკულ რეკომენდაციებზე.



ფიგ. 3.1. გვირაბის ხანძრის შესწავლის მეთოდოლოგიური სტრუქტურა

მეთოდოლოგიური ეტაპები მარტივად იდენტიფიცირდება და მათი თანამიმდევრობა ლოგიკური და ადვილად გასაგებია. დიაგრამა ასახავს კვლევის თანამიმდევრულ სტრუქტურას — დაწყებული დარგთაშორისი ანალიზით, დასრულებული დარგობრივ რეკომენდაციებზე გადასვლით. ჩარჩო მოიცავს შემდეგ კომპონენტებს: CFD მოდელირება, MATLAB კოდირება, RSET/ASET შედარება და სტრატეგიული ინდექსების შეფასება.

სტრატეგიული ინდექსები გამოიყენება სიცოცხლის, ინფრასტრუქტურისა და ეკონომიკური ზიანის რაოდენობრივი შეფასებისთვის. თითოეული ინდექსი ეფუძნება მარტივ პრინციპს და პროცენტულად გამოითვლება შემდეგი ფორმულებით:

1. სიცოცხლის რისკის ინდექსი (LRI) აჩვენებს, რამდენი ადამიანი დაიღუპა ხანძრის ზონაში მყოფთა საერთო რაოდენობიდან

$$LRI = \frac{N_{fatalities}}{N_{exposed}} \cdot 100 \% \quad (3.1)$$

სადაც $N_{fatalities}$ არის დაღუპულთა რაოდენობა; $N_{exposed}$ — ხანძრის ზონაში მყოფი ადამიანების საერთო რაოდენობა. მაგალითად: თუ 5 ადამიანი დაიღუპა 100-დან, ინდექსი იქნება 5 %.

2. ინფრასტრუქტურის ზიანის ინდექსი (IDI):

$$IDI = \frac{C_{damage}}{C_{total}} \cdot 100 \% \quad (3.2)$$

სადაც C_{damage} არის ინფრასტრუქტურაზე მიყენებული ზიანის ღირებულება; C_{total} — ინფრასტრუქტურის სრული ღირებულება.

3. ეკონომიკური ზემოქმედების ინდექსი (EEI):

$$EEI = \frac{T_{\text{downtime}} \cdot R_{\text{loss}}}{GDP_{\text{sector}}} \cdot 100 \% \quad (3.3)$$

სადაც T_{downtime} არის ინფრასტრუქტურის გაჩერების ხანგრძლივობა, დღე-ღამე; R_{loss} — დღიური ეკონომიკური დანაკარგი, ლ/დღ-ღამე; GDP_{sector} — სექტორის წლიური მთლიანი პროდუქტი, ლ.

ინდექსების შეფასების შემდეგ, ანალიზი გადადის გარდამავალ ფაზაში, სადაც ის გარდაიქმნება კონკრეტულ სფეროზე მორგებულ პრაქტიკულ რეკომენდაციებად — მათ შორის ვენტილაციის სტრატეგიებად, ევაკუაციის მარშრუტებად და უსაფრთხოების სისტემის დიზაინად.

ამჟამად, რომ მეთოდოლოგიური ჩარჩო დაფუძნებულია ინტერდისციპლინურ ანალიზზე. თუმცა, კონკრეტული სცენარის ანალიზისას აუცილებელია გადავიდეთ სფეროსთვის სპეციფიკურ რეკომენდაციებზე. ეს გარდამავალი ფაზა წარმოადგენს წერტილს, როდესაც უნივერსალური ანალიტიკური მიდგომა გარდაიქმნება მოცემული სფეროს კონკრეტული მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ამჟამად არ არსებობს უნივერსალური მოდელი — პრაქტიკული რეკომენდაციების ფორმირება ყოველთვის დამოკიდებულია კონკრეტულ კონტექსტზე და მოითხოვს ინტეგრირებულ ანალიზს სცენარის მახასიათებლების, ტექნიკური შესაძლებლობებისა და ადამიანური ფაქტორების საფუძველზე.

3.2. საავტომობილო გვირაბის ხანძრის სცენარი

გვირაბში ხანძრის სცენარის ანალიზის მიზანია პროფესიული უსაფრთხოების მდგომარეობის შეფასება რეალურ კონტექსტში - კერძოდ, საავტომობილო გვირაბში ხანძრის პირობებში - და შემოთავაზებული მეთოდოლოგიური ჩარჩოს პრაქტიკული გამოყენებადობის შეფასება. სცენარი შემოწმებულია პროფესიული უსაფრთხოების სპეციალისტის შესაძლებლობებზე დაკისრებული მოთხოვნების საფუძველზე.

როგორც [21-24]-ში არის აღწერილი, პროფესიული უსაფრთხოება ფუნდამენტური დისციპლინაა, რომელიც აერთიანებს რისკების ანალიზსა და მართვას მრავალ სექტორში. უსაფრთხოება უნდა იყოს მხარდაჭერილი უნივერსალური, ინტერდისციპლინარული მოდელით, რომელიც უსაფრთხოების სისტემების სისტემატური შეფასებისა და უწყვეტი გაუმჯობესების საშუალებას იძლევა.

პროფესიული უსაფრთხოება (OSH – Occupational Safety and Health) მოიცავს ყველა იმ სტრატეგიას, პოლიტიკას და პრაქტიკას, რომელიც მიზნად ისახავს საგზაო მოძრაობის მონაწილეთა ჯანმრთელობისა და სიცოცხლის დაცვას; რისკების იდენტიფიცირებას, შეფასებას, შემცირებასა და ორგანიზაციებში მარეგულირებელი ნორმების დაცვის უზრუნველყოფას.

ეს სფერო განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სამრეწველო, სატრანსპორტო, სამშენებლო, სამთო და ჯანდაცვის სექტორებში, სადაც რისკები მაღალია. შრომის

უსაფრთხოების სპეციალისტის ცოდნის ზღვარი არ არის მხოლოდ ტექნიკური, ის მოიცავს მრავალმხრივ კომპეტენციებს, რომლებიც აღწერილია პირველ ცხრილში.

ეს სფერო განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სამრეწველო, სატრანსპორტო, სამშენებლო, სამთო და ჯანდაცვის სექტორებში, სადაც რისკის დონე მაღალია. უსაფრთხოების სპეციალისტის როლი მოიცავს კომპეტენციების მრავალფეროვან ნაკრებს - ტექნიკური უნარებიდან სტრატეგიულ პროგნოზირებამდე. ცხრილი 3.1 ასახავს ძირითადი სფეროებს, რომლებიც საჭიროა უსაფრთხოების ეფექტური მართვისთვის მაღალი რისკის გარემოში, მათ შორის სატრანსპორტო ინფრასტრუქტურაში.

ცხრილი 3.1. პროფესიული უსაფრთხოების სპეციალისტის კომპეტენციის აღწერა

კომპეტენცია	აღწერა
ტექნიკური ცოდნა	რისკების შეფასება, PPE-ს გამოყენება, უსაფრთხოების სისტემების დაპროექტება, აგება და ექსპლუატაცია
სამართლებრივი ჩარჩო	შრომის კოდექსი, უსაფრთხოების რეგულაციები, ინსპექციის პროცედურები
კომუნიკაცია და ტრენინგი	თანამშრომლების ინფორმირება, ტრენინგების ჩატარება, სათანადო კულტურის ფორმირება
ფსიქოლოგიური და ქცევითი ანალიზი	ადამიანის ფაქტორის გათვალისწინება, სტრესის მართვა
სტრატეგიული ხედვა	უსაფრთხოების პოლიტიკის შემუშავება, ინოვაციური მიდგომების დანერგვა

საქართველოში, უსაფრთხოების სპეციალისტად მუშაობისთვის საჭიროა შესაბამისი სერტიფიკატი, რომელიც შეიძლება მიიღოს დიპლომის მქონე ნებისმიერმა პირმა, თუ გაივლის სათანადო აკრედიტებულ კურსს.

სპეციალისტის კარიერული გზა, როგორც წესი, სამ ეტაპად მიმდინარეობს: 1. საწყისი ეტაპი — სერტიფიცირება და პრაქტიკული გამოცდილების შეძენა; 2. საშუალო დონე — რისკების შეფასების ჩატარება, ინსპექტირებასა და ტრენინგებში მონაწილეობა ან მათი უშუალო ხელმძღვანელობა; 3. ექსპერტის დონე — უსაფრთხოების პოლიტიკის შემუშავება, სტრატეგიული უსაფრთხოების ინიციატივების მართვა და საერთაშორისო სტანდარტების დანერგვა. ცხრილი 2 წარმოადგენს კვლევის განმავლობაში გამოყენებულ ძირითად აბრევიატურებს, რომლებიც განმარტავს ტექნიკურ ტერმინოლოგიას და უზრუნველყოფს უსაფრთხოების მეტრიკისა და მოდელირების პარამეტრების ინტერპრეტაციის თანმიმდევრულობას.

ცხრილი 3.2. ხშირად გამოყენებული აბრევიატურების (ტერმინების) განმარტება

აბრევიატურა	სრული ფორმა	განმარტება
PPE	Personal Protective Equipment	ინდივიდუალური დამცავი საშუალებები, როგორიცაა ჩაფხუტი, ნიღაბი, ხელთათმანი, უსაფრთხოების ფეხსაცმელი — გამოიყენება

		ფიზიკური, ქიმიური ან თერმული რისკებისგან დასაცავად
RSET	Required Safe Egress Time	დრო, რომელიც აუცილებელია ადამიანების უსაფრთხო ევაკუაციისთვის, მოიცავს წინასწარ მომზადების დროს + გადაადგილების დროს
ASET	Available Safe Egress Time	დრო, რომელიც რეალურად ხელმისაწვდომია ევაკუაციისთვის, სანამ გარემო გახდება სიცოცხლისთვის საშიში (მაგ. მოწამვლა, მაღალი ტემპერატურა, დაბალი ხილვადობა)

განვიხილოთ კონკრეტული სცენარი: ხანძრის რისკის შეფასება საავტომობილო გვირაბში. მიზანია იმის დადგენა, თუ რამდენად უსაფრთხოა გვირაბი ხანძრის შემთხვევაში და როგორ უნდა მოიქცეს უსაფრთხოების სპეციალისტი NFPA 130 ან ISO 2631 სტანდარტების შესაბამისად. ცხრილი 3.3 კატეგორიულად აქცევს უსაფრთხოების სპეციალისტის კომპეტენციების განვითარებას ხუთ სფეროში - ტექნიკური მოდელირებიდან ინტეგრირებულ სტრატეგიულ ხედვამდე - რაც ასახავს პროფესიული უსაფრთხოების ექსპერტიზის მრავალმხრივ ბუნებას.

ცხრილი 3.3. სპეციალისტის კომპეტენციის ზღვარი

დონის დაასახელება	სპეციალისტის კომპეტენცია
ტექნიკური	CFD, MATLAB, NFPA/ISO სტანდარტები
ანალიტიკური	RSET/ASET შედარება, რისკის ინდექსების განსაზღვრა
სტრატეგიული	უსაფრთხოების პოლიტიკის ფორმირება
კომუნიკაციური	ტრენინგების ჩატარება, ინსპექტირების ანგარიშის შედგენა
ინტეგრირებული ხედვა	ევაკუაციის, ვენტილაციისა და რისკის ერთიანი მოდელის აღქმა პროფესიულ დონეზე

განმარტება: CFD მოდელირება არის კომპიუტერების გამოყენება სითხეებისა და აირების მსგავსი სითხეების ქცევის რიცხობრივი ამოხსნისა და ანალიზისთვის. MATLAB, შემოკლებული MATrix LABoratory - „მატრიცული ლაბორატორია“ არის მაღალი დონის პროგრამირებისა და რიცხვითი გამოთვლების პლატფორმა. სტუ-ს აქვს რიცხვითი მოდელირების პროგრამები PyroSim და PathFinder, ხოლო ამ სტრიქონების ავტორს გავლილი აქვს აღნიშნული პროგრამების გამოყენებისადმი მიძღვნილი ტრენინგები ლონდონის უნივერსიტეტსა და ლონდონის სამეფო კოლეჯში.

3.3. შესასრულებელი ანალიზის ეტაპები

1. რისკის იდენტიფიკაცია. პოტენციური ანთების წყაროებია სატრანსპორტო საშუალებები და ელექტრო კაბელები. შესაძლო მასშტაბი მერყეობს მცირე ხანძრიდან სრულად განვითარებულ ხანძრამდე. ადამიანური ფაქტორები მოიცავს საგზაო მოძრაობის მონაწილეთა რაოდენობას და მათ ქვევას პანიკურ სიტუაციებში.

2. CFD მოდელირება. თერმული დატვირთვა გამოითვლება ენერგიის გამოყოფის საფუძველზე, რომელიც იზომება მეგავატებში (მგვტ). ტოქსიკური ზონა განისაზღვრება წვის პროდუქტების, როგორიცაა CO , CO_2 და NO_x , გავრცელებით. ხილვადობა 10 მეტრზე ქვემოთ ითვლება ევაკუაციის კრიტიკულ ზღურბლად. მოდელი ასევე აანალიზებს სუფთა და დაბინძურებული ჰაერის ნაკადების განაწილებას, ვენტილაციის ეფექტურობას და საგანგებო ვენტილაციის პარამეტრებს.

3. ევაკუაციის მოდელირება. სცენარების სიმულაციები ტარდება სხვადასხვა დროის, ადგილმდებარეობისა და ადამიანთა რაოდენობის მიხედვით. დროის ფანჯარა ფასდება RSET-ის (უსაფრთხო ევაკუაციისათვის აუცილებელი დრო) და ASET-ის (ხელმისაწვდომი დრო უსაფრთხო ევაკუაციისათვის) ერთმანეთთან შედარებით. განიხილება ბარიერები და ალტერნატიული მარშრუტები, მათ შორის კარების განთავსება, განათება და სიგნალიზაციის სისტემები.

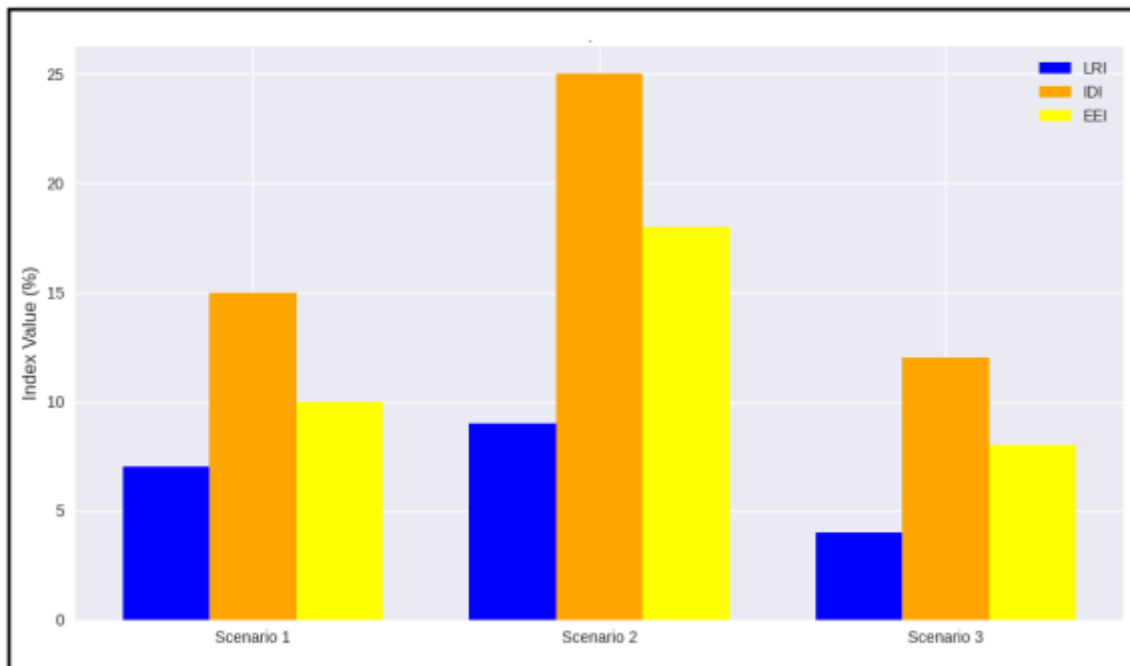
4. უსაფრთხოების სტრატეგიები. აქტიური სისტემები: სპრინკლერები და დრენჩერები, კვამლის განცალკევებული არინება; პასიური ელემენტები: ცეცხლგამძლე მასალების, ზონირების გამოყენება, როცა ერთმანეთისაგან გამიჯნულია სუფთა ჰაერის მოსაწოდებელი და გაჟუჟყიანებული ჰაერის ასარინებელი ზონები; ადამიანური ფაქტორის მართვა მოიცავს ტრენინგს, ინფორმაციის გავრცელებას და ფსიქოლოგიურ მზადყოფნას.

პრაქტიკაში, ინდივიდუალური დამცავი აღჭურვილობა გამოიყენება პრევენციული ღონისძიების სახით - მაგალითად, გვირაბის პერსონალი აღჭურვილი უნდა იყოს სითბოს და CO -ს ზემოქმედებისგან დაცვით. იმისათვის, რომ ევაკუაცია უსაფრთხოდ ჩაითვალოს, RSET უნდა იყოს ASET-ზე ნაკლები. ამ დროის ინტერვალების გამოსათვლელად და შესადარებლად გამოიყენება CFD მოდელირება ან MATLAB კოდი.

ცხრილი 3.4 აჯამებს გვირაბის ხანძრის სცენარებთან დაკავშირებულ ძირითად რისკ-კატეგორიებს. თითოეულის შეფასება ხდება ალბათობის, სიმძიმისა და სტრატეგიული ზემოქმედების მიხედვით. ეს მატრიცა სცენარის მოდელირებისა და ჩარევის პრიორიტეტულობის საფუძველს წარმოადგენს. ზოგადი რისკ-კატეგორიები შეჯამებულია ცხრილში 3.4, ხოლო MATLAB-ის გამოყენებით მოდელირებული კონკრეტული სცენარი წარმოდგენილია ცხრილში 3.5. ცხრილები 3.4-3.16 მოცემულია დანართში.

ფიგ. 3.2-ზე მოცემულია სტრატეგიული რისკის ინდექსების დიაგრამა გვირაბის ხანძრის სცენარების მიხედვით. დიაგრამა ასახავს სიცოცხლის რისკის (LRI), ინფრასტრუქტურული ზიანის (IDI) და ეკონომიკური ზემოქმედების (EEI) ინდექსებს სამ სხვადასხვა სცენარში. ვიზუალური შედარება საშუალებას იძლევა სწრაფად განისაზღვროს, თუ რომელი სცენარი საჭიროებს პრიორიტეტულ რეკომენდაციებს

სიცოცხლის უსაფრთხოების, ინფრასტრუქტურის გამძლეობის ან ეკონომიკური სტაბილურობის თვალსაზრისით.



ფიგ. 2. სტრატეგიული რისკის ინდექსები გვირაბის ხანძრის სცენარების მიხედვით
 ლურჯი ფერი ასახავს სიცოცხლის რისკის ინდექსს (LRI), ნარინჯისფერი — ინფრასტრუქტურის ზიანის ინდექსს (IDI), ყვითელი — ეკონომიკური ზემოქმედების ინდექსს (EEI). დიაგრამა აჩვენებს, რომ მე-2 სცენარში ინფრასტრუქტურის ზიანი (IDI) ყველაზე მაღალია, ხოლო მე-3 სცენარში სიცოცხლის რისკი (LRI) ყველაზე დაბალია.

3.4. ASET-ის დინამიკა ვენტილაციის სტრატეგიების მიხედვით

ვენტილაციის სტრატეგიები.

1. პასიური ვენტილაცია (ბუნებრივი) - მახასიათებლები დამოკიდებულია ცხელი ჰაერის სიმკვრივისა და ამის შედეგად წნევის გრადიენტის ცვალებადობაზე; შედეგი - ASET დაბალია (~60–120 წმ), რადგან კვამლი დაბალი სიჩქარით მოცილდება გვირაბს; შესაფერისია მცირე სიგრძის გვირაბებისთვის ან დაბალი რისკის ზონებისთვის.

2. მექანიკური ვენტილაცია ღერძული ვენტილატორების გამოყენებით - ღერძული ვენტილატორები 5–10 მ³/წმ წარმადობით, კვამლის გამწოვი ჰაერსადენებით; შედეგი - ASET - (უსაფრთხო ევაკუაციისათვის ხელმისაწვდომი დროის შუალედი, გარემოს სიცოცხლისთვის საშიშ დონემდე გაჭუჭყიანებამდე) იზრდება (~180–300 წმ), რადგან ჰაერის ნაკადი სწრაფად ამორებს ტოქსიკურ ნივთიერებებს მექანიკური ვენტილაციის სიძლიერის გამო; შესაფერისია საშუალო სიგრძის გვირაბებისთვის.

3. ჰიბრიდული (კომბინირებული) სტრატეგია (კვამლის გაძლიერებული გაწოვით) - გამოიყენება კვამლის ფარდები, ტრანსფორმირებადი სისტემები და ელემენტები [3-6], ჭავლური ვენტილატორები, კვამლის გრძივი და განივი კონტროლი; შედეგი - ASET მაქსიმალურია (>300 წმ), რადგან ხდება ზონირებული ევაკუაცია და მოწამვლის ზონების ლოკალიზაცია; შესაფერისია - გრძელი და რთული გვირაბებისთვის, საგზაო მოძრაობის მონაწილეთა მაღალი სიმჭიდროვით.

დანართის ცხრილი 3.6. ვენტილაციის სტრატეგია და რისკების შედარება. მიზანი: ეს ცხრილი იძლევა გვირაბის ხანძრის რისკების ზოგად კლასიფიკაციას ალბათობის, ზემოქმედებისა და პრიორიტეტულობის მიხედვით. კონტექსტი: ის გამოიყენება რისკის იდენტიფიცირების საწყისი ფაზის დროს, ნებისმიერი სცენარისთვის სპეციფიკური მოდელირების დაწყებამდე. შენიშვნა: დანართის 3.7 ცხრილისაგან განსხვავებით, ეს მატრიცა არ ასახავს რაოდენობრივი მოდელირების შედეგებს, მაგრამ ემსახურება სტრატეგიულ მიმოხილვას უსაფრთხოების ინტერვენციების პრიორიტეტულობის დასადგენად.

MATLAB მოდელის საწყისი კონფიგურაციის პარამეტრები — მათ შორის ვენტილატორის სიმძლავრე, ვენტილატორების რაოდენობა, კვამლის ფენის სიმაღლე, ხანძრის გაჩენის დრო და კრიტიკული ხილვადობის ზღვარი — შეჯამებულია დანართის ცხრილში 3.9. ეს პარამეტრები საკმარისია სცენარის დასაყენებლად და არ საჭიროებს აღნიშნულის სქემატურ გამოსახვას.

MATLAB მოდელზე გაანგარიშება შესრულებულია $F = 4.5$ წმ²/მ³ ეფექტურობის კოეფიციენტისათვის, სხვადასხვა წარმადობის 2, 3 და 4 ცალი ვენტილატორისათვის შემდეგი ფორმულით.

$$ASET_{matrix} = t + QFn \quad (3.4)$$

სადაც $ASET_{matrix}$ არის მატრიცული ანგარიშით მიღებული ევაკუაციისთვის ხელმისაწვდომი დრო, აითვლება წამებში გარემოს სიცოცხლისათვის საშიშ დონემდე გაჭუჭყიანებამდე; $t = 0$ - ხანძრის დაწყების დრო, წმ; Q - ვენტილატორის წარმადობა, მ³/წმ; n - ვენტილატორების რიცხვი. მიღებული შედეგები შეტანილია დანართის 3.6 ცხრილში. $F = 4.5$ წმ²/მ³ ეფექტურობის კოეფიციენტი ამ ნაშრომში პირველად შემოგვაქვს და ქვემოთ ცალკე პარაგრაფს მივუძღვნით მის განხილვას. (3.4) ფორმულით მიღებული შედეგები მოცემულია დანართის ცხრილში 3.8.

დანართის ცხრილი 3.9 – CFD მოდელირების სცენარის პარამეტრები. დანიშნულება: ეს ცხრილი ასახავს გვირაბის ხანძრის სცენარებისთვის CFD სიმულაციებში გამოყენებულ საწყის პარამეტრებს. კონტექსტი: ის მხარს უჭერს ჰაერის ნაკადის, სითბოს გამოყოფისა და კვამლის გავრცელების მოდელირებას განსაზღვრულ პირობებში. შენიშვნა: ეს პარამეტრები ფუნდამენტურია ASET-ის გამოთვლისა და ევაკუაციის დინამიკის ვიზუალიზაციისთვის.

3.8 ცხრილთან კავშირი: ცხრილი 3.8 წარმოადგენს ASET-ის შედარებით მნიშვნელობებს ამ პარამეტრებზე დაყრდნობით, ხოლო ცხრილი 3.9 ფოკუსირებულია თავად დაყენებაზე.

დაკვირვება ცხრილიდან 3.8: ASET წრფივად იზრდება ვენტილატორის სიმძლავრესა და ვენტილატორების რაოდენობასთან ერთად. მაქსიმალური კონფიგურაცია (>180 წმ) უზრუნველყოფს უსაფრთხო ევაკუაციას. მინიმალური კონფიგურაცია ($5 \text{ მ}^3/\text{წმ}$, 2 ვენტილატორი) არასაკმარისია რთული სცენარებისთვის.

ქვემოთ მოცემულია დანართის ცხრილი 3.10, რომელიც შედგენილია MATLAB კოდის გამოყენებით ევაკუაციის დროის შესაფასებლად (სინამდვილეში RSET/ASET შედარებისთვის). დანართის ცხრილი 3.11 აჩვენებს ვენტილაციის სტრატეგიის შედარებას. მიზანი: ეს ცხრილი ადარებს სხვადასხვა ვენტილაციის სტრატეგიას ASET-ზე მათი გავლენისა და RSET-თან თავსებადობის თვალსაზრისით. კონტექსტი: ის გამოიყენება გრძივი, განივი, ნახევრად განივი და ტრანსფორმირებადი სისტემების ეფექტურობის შესაფასებლად.

შენიშვნა: დანართის ცხრილები 3.8 და 3.10 გვაწვდის მოდელირებულ შედეგებს და RSET/ASET-ის კონკრეტულ მნიშვნელობებს, დანართის ცხრილი 3.11 კი გვთავაზობს სტრატეგიულ ჩარჩოს ვენტილაციის მიდგომების შესარჩევად.

3.5. ASET და RSET დინამიკა

თუ ვენტილატორის წარმადობა $Q = 10 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ და გვაქვს $n = 4$ ვენტილატორი, მაშინ $F = 4.5 \text{ წმ}^2/\text{მ}^3$ ეფექტურობის კოეფიციენტის პირობებში $ASET = FQn = 4.5 * 10 * 4 = 180 \text{ წმ}$. ცხრილში მოცემული სიდიდეების მიხედვით RSET მოდელიდან გამოდის - $RSET = t + \frac{L}{U}k = 45 + \frac{120}{0.9} \cdot 1.2 = 205 \text{ წმ}$. შედარება: ASET = 180 წამი; RSET = 205 წამი.

დასკვნა დანართის 3.10 ცხრილის მონაცემების მიხედვით: ევაკუაციის დრო (205 წმ) აღემატება უსაფრთხო ფანჯარას (180 წმ), ამიტომ უსაფრთხო ევაკუაცია შეუძლებელია. უსაფრთხო ევაკუაციის უზრუნველსაყოფად საჭიროა ვენტილატორის წარმადობის (სიმძლავრის) ან მათი რაოდენობის გაზრდა. აღნიშნული შესაძლებელია აგრეთვე ევაკუაციის სტრატეგიის ოპტიმიზაციით. მაგალითად, რეაგირების დროის შემცირებით უფრო უკეთესი წინასწარი მომზადების პირობებში (შეტყობინების სისტემის უფრო საიმედო მოქმედებით), აგრეთვე დამატებითი გასასვლელების მოწყობით და ამ უკანასკნელთა შორის მანძილის შემცირებით.

ამგვარად, ASET არის დრო, რომლის განმავლობაშიც გარემო შესაძლებელია იყოს უსაფრთხო ევაკუაციისთვის. მასზე გავლენას ახდენს:

- ვენტილაციის ეფექტურობა – რამდენად სწრაფად ხდება კვამლისა და სითბოს მოცილება გვირაბიდან;
- ვენტილატორების სიმძლავრე და რაოდენობა, მეტი ვენტილატორი ნიშნავს მეტ ჰაერს და კვამლისა და სითბოს სწრაფ მოცილებას გვირაბიდან;

- კვამლის ფენის სისქე გვირაბის ზედა ნაწილში და ჭერთან, თუ კვამლის ფენა ავსებს გვირაბს და ეშვება იატაკისაკენ, ASET მცირდება.

RSET არის დრო, რომელიც რეალურად სჭირდება ადამიანებს ევაკუაციისთვის. მასზე გავლენას ახდენს:

- პანიკის შედეგად საფრთხეზე რეაგირებისათვის საჭირო დროის შუალედის ხანგრძლივობა;
- შეტყობინების სისტემის გაუმართაობა;
- საგზაო მოძრაობის მონაწილეებთან სუსტი კომუნიკაცია;
- ადამიანების გადაადგილების საშუალო სიჩქარე;
- მოძრაობის შეფერხება;
- უსაფრთხო ადგილამდე მანძილის სიშორე.

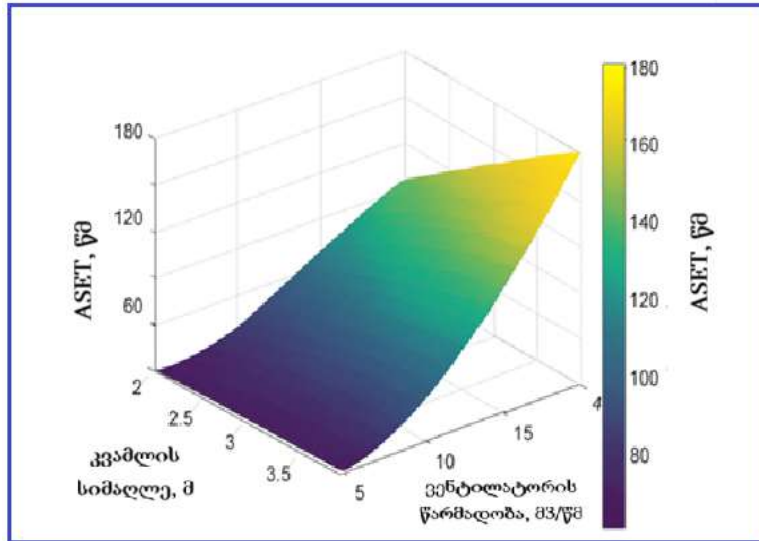
კვამლის ფენის გავლენა ASET-ზე:

- თუ კვამლი ეშვება იატაკისაკენ < 2 მ-ზე, ხილვადობა და ტოქსიკურობა იზრდება;
- აღნიშნული ამცირებს ASET-ს, რადგან გარემო სწრაფად ხდება სიცოცხლისთვის საშიში;
- CFD მოდელირებაში კვამლის ფენის სიმაღლე უნდა იყოს დინამიკური პარამეტრი, რომელიც იცვლება ვენტილატორების კონფიგურაციის შესაბამისად.

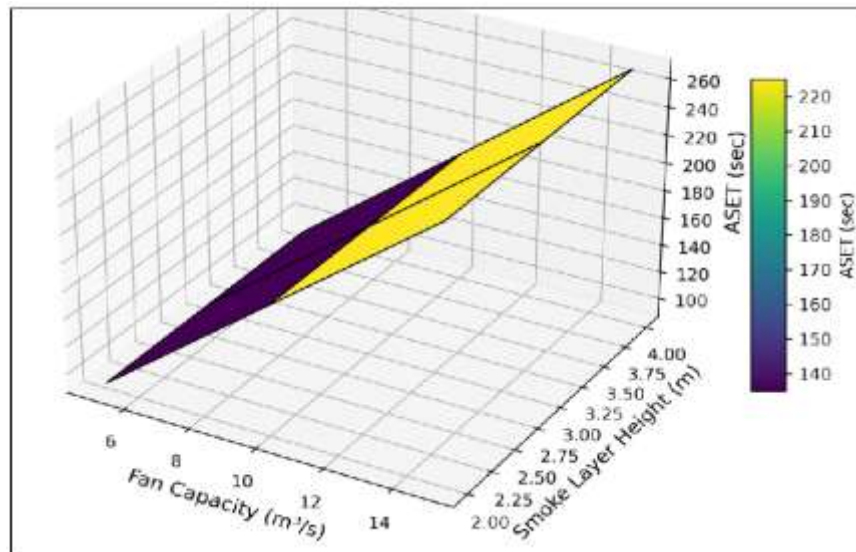
ვენტილატორების მინიმალური კონფიგურაციები ($5 \text{ მ}^3/\text{წმ}$, 2 ვენტილატორი) ვერ უზრუნველყოფს უსაფრთხო ევაკუაციას. $10 \text{ მ}^3/\text{წმ}$, 4 ცალი ვენტილატორის პირობებში - ზღვარზეა. ევაკუაციის უზრუნველსაყოფად საჭიროა დამატებითი სტრატეგიები (მაგალითად, საფრთხეზე რეაგირების დროის შემცირება). $15 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ წარმადობის, 4 ვენტილატორი უზრუნველყოფს საკმარის ASET-ს (> 270 წამზე).

ფიგ. 3.3 და 3.4 ასახავს ASET-ის ცვლილებას ვენტილატორის სიმძლავრისა და კვამლის ფენის სიმაღლის მიხედვით. ფიგ. 3.3 წარმოადგენს MATLAB-ის მოდელირების უშუალო შედეგს — 3D ზედაპირის გრაფიკს, რომელიც აჩვენებს, თუ როგორ იცვლება ASET ვენტილატორის სიმძლავრის (X-ღერძი: $5\text{--}15 \text{ მ}^3/\text{წმ}$) და კვამლის ფენის სიმაღლის (Y-ღერძი: $2\text{--}4$ მ) მიხედვით. Z-ღერძზე წარმოდგენილია ASET-ის მნიშვნელობა ($60\text{--}180$ წამი). მოდელირება აჩვენებს, რომ ASET იზრდება ვენტილატორის სიმძლავრისა და კვამლის ფენის სიმაღლის მატებასთან ერთად, რაც უზრუნველყოფს უკეთეს ხილვადობას, ნაკლებ ტოქსიკურობას და უსაფრთხო ევაკუაციის პირობებს.

ფიგ. 3.4 კი გვთავაზობს ინტეგრირებულ ინტერპრეტაციას, რომელიც აერთიანებს მოდელირების მონაცემებს სტრატეგიულ რეკომენდაციებთან. მიუხედავად ვიზუალური მსგავსებისა, ფიგ. 3.4 არ არის ფიგ. 3.3-ის დუბლირება. ის ხაზს უსვამს ვენტილაციის პარამეტრების ოპტიმიზაციის მნიშვნელობას და უსაფრთხო ევაკუაციის ფანჯრის გაფართოების სტრატეგიულ აუცილებლობას.



ფიგურა 3.3. ASET-ის ტექნიკური მოდელირება ვენტილატორის სიმძლავრისა და კვამლის ფენის სიმაღლის მიხედვით (MATLAB-ის 3D ზედაპირის გრაფიკი)
 გრაფიკი ასახავს, როგორ იცვლება ხელმისაწვდომი უსაფრთხო ევაკუაციის დრო (ASET) ფანის სიმძლავრის (X-ღერძი: 5–15 მ³/წმ) და smoke layer-ის სიმაღლის (Y-ღერძი: 2–4 მ) მიხედვით. Z-ღერძზე წარმოდგენილია ASET-ის მნიშვნელობა (60–180 წამი). ღია ფერები მიუთითებს უფრო მაღალ ASET-ზე, რაც ნიშნავს უკეთეს ხილვადობას, ნაკლებ ტოქსიკურობას და უსაფრთხო ევაკუაციის პირობებს. გრაფიკი გამოიყენება კონკრეტული სცენარის ტექნიკური ანალიზისთვის და წარმოადგენს MATLAB მოდელირების უშუალო შედეგს.



ფიგ. 3.4. ASET-ის სტრატეგიული ინტერპრეტაცია ფანის სიმძლავრისა და კვამლის ფენის სიმაღლის მიხედვით

გრაფიკი წარმოადგენს ინტერპრირებულ ხედვას, რომელიც აერთიანებს მოდელირების მონაცემებს სტრატეგიულ რეკომენდაციებთან. ASET იზრდება ფანის სიმძლავრის და

კვამლის სიმაღლის მატებასთან ერთად, რაც უზრუნველყოფს უსაფრთხო ევაკუაციის ფანჯრის გაფართოებას. ღია ფერები მიუთითებს უსაფრთხო პირობებზე. გრაფიკი ხაზს უსვამს ვენტილაციის პარამეტრების ოპტიმიზაციის აუცილებლობას რთულ გვირაბებში.

ფიგ. 3.3-ზე და ფიგ. 3.4-ზე მოცემული გრაფიკები აგრეთვე აჩვენებს საერთო ტენდენციას - ASET-ის პირდაპირ პროპორციულ დამოკიდებულებას ორივე პარამეტრის მიმართ. იზრდება ვენტილატორის სიმძლავრე და კვამლის დამორების მანძილი გვირაბის იატაკიდან - იზრდება უსაფრთხო ევაკუაციის ფანჯარა. ორივე პარამეტრის შემცირების შედეგად კი მცირდება უსაფრთხო ევაკუაციის ფანჯარა და გვაქვს ევაკუაციისათვის არასაკმარისი დრო.

3.6. ASET და RSET გამოყენების კონტექსტი

ASET ფორმულა აერთიანებს ვენტილატორის სიმძლავრეს, ვენტილატორების რაოდენობას და ვენტილაციის ეფექტურობას, რაც გამოიყენება CFD მოდელირებაში. RSET ფორმულა ეფუძნება ადამიანურ ფაქტორებს და გამოიყენება ევაკუაციის ალგორითმებში. შედარებითი პირობა $RSET < ASET$ განსაზღვრავს, შესაძლებელია თუ არა უსაფრთხო ევაკუაცია მოცემულ პირობებში.

დანართის ცხრილი 3.12 წარმოადგენს სტრატეგიული ინდექსების (LRI, IDI, EEI) ზღვრულ ღიაპაზონებს და ინტერპრეტაციებს, რომლებიც გამოიყენება სიცოცხლის რისკის, ინფრასტრუქტურის დაზიანებისა და ეკონომიკური ზემოქმედების შესაფასებლად. დანართის ცხრილი 3.13 წარმოადგენს სხვადასხვა პარამეტრების გავლენას ASET-ზე — ევაკუაციისთვის ხელმისაწვდომ დროზე — და RSET-ზე — უსაფრთხო ევაკუაციისთვის საჭირო დროზე (რეაქციის დრო + უსაფრთხო ადგილამდე გადაადგილების დრო).

დანართის 3.13 ცხრილის ინტერპრეტაცია:

- ASET-ის გასაზრდელად უნდა იმუშაო ტექნიკურ და გარემო პარამეტრებზე: ვენტილატორის წარმადობა (სიმძლავრე), კვამლის ფენის სიმაღლე (დამორება იატაკიდან), ვენტილაციის ეფექტურობა.
- RSET-ის შესამცირებლად უნდა იმუშაო ქცევით და გეომეტრიულ ფაქტორებზე: ნაკლები დროის დახარჯვა დაბნეულობაზე და ევაკუაცია უნდა დაიწყოს რაც შეიძლება სწრაფად, უნდა გაიზარდოს გადაადგილების სიჩქარე, უნდა შემცირდეს გასავლელი მანძილი უსაფრთხო სივრცემდე, უნდა გამოირიცხოს საცობების შექმნა მოძრაობის გზაზე.
- შედარებითი ანალიზი განსაზღვრავს, შესაძლებელია თუ არა უსაფრთხო ევაკუაცია მოცემულ სცენარში.

3.7. ეფექტურობის კოეფიციენტი $\mathcal{F}$

გამოყენებული განზომილება $\text{წმ}^2/\text{მ}^3$ (წამი კვადრატზე ერთ კუბურ მეტრზე) ნამდვილად არატრადიციულია, რაც მიუთითებს, რომ ეს კოეფიციენტი მიღებულია კონკრეტული ფორმულის განზომილებითი ბალანსის დასაცავად. თუ ფორმულა, რომელშიც $\mathcal{F}$ გამოიყენება, დაკავშირებულია ევაკუაციის დროის ან ჰაერის გაწმენდის დინამიკასთან, მაშინ $\mathcal{F}$ შეიძლება წარმოადგენდეს სისტემის რეაგირების ეფექტურობას მოცულობის მიმართ, ანუ: 1. რამდენად სწრაფად ხდება დაბინძურებული ჰაერის გაწმენდა; 2. ან რამდენად სწრაფად ხდება სითბოს ან ტოქსიკური ნივთიერებების არინება [30-35].

$\text{წმ}^2/\text{მ}^3$ შეიძლება გაჩნდეს, როცა: დროის კვადრატი (წმ^2) მოდის დიფუზიური ან არინების პროცესიდან, მაგალითად $t^2 \sim \frac{x^2}{D}$, სადაც D არის დიფუზიის კოეფიციენტი, ხოლო მ^3 მოდის მოცულობისგან — გვირაბის სივრცეიდან. შესაბამისად, $\mathcal{F}$ შეიძლება წარმოადგენდეს: „დროის კვადრატის შეფარდებას მოცულობასთან“, რაც მიუთითებს, რომ მოცულობის ერთეულზე საჭიროა გარკვეული დროის ფანჯარა (შუალედი) ეფექტური გაწმენდისთვის.

ამგვარად, $\mathcal{F} = 4.5 \text{ წმ}^2/\text{მ}^3$ შეიძლება განიმარტოს როგორც „სისტემის ეფექტურობის კოეფიციენტი, რომელიც მიუთითებს, რომ მოცულობის ერთეულზე (1 მ^3) საჭიროა 4.5 წმ^2 დროის ინტენსიურობა, რათა მოხდეს ეფექტური რეაგირება (მაგ. ჰაერის გაწმენდა, ტოქსიკური ნივთიერების არინება ან სითბოს განეიტრალება).“

ჩვენს მოდელირებაში, ვენტილაციის ეფექტურობის კოეფიციენტი გამოიყენება სხვადასხვა ვენტილაციის სისტემის აეროდინამიკური წინააღმდეგობისა და ეფექტურობის წარმოსადგენად. გამოყენებული იქნა მნიშვნელობა $\mathcal{F} = 4.5 \text{ წმ}^2/\text{მ}^3$, რომელიც შეესაბამება აქტიურ ვენტილაციის სისტემას. თუ $\mathcal{F} < 1.0$, ASET ფანჯარა კრიტიკულად ხანმოკლე ხდება, რაც საფრთხეს უქმნის ევაკუაციის უსაფრთხოებას.

ტრანსფორმირებადი ვენტილაციის სისტემები, კერძოდ, ზრდის აეროდინამიკურ წინააღმდეგობას გვირაბში და აფერხებს ტოქსიკური აირების გავრცელებას ევაკუაციის მარშრუტებზე. ეს ეფექტი ზრდის ASET ფანჯარას და ზრდის გადარჩენის უნარს. ამიტომ, ასეთი სისტემებისთვის რეკომენდებულია უფრო მაღალი მნიშვნელობები, როგორც ეს ასახულია დანართის ცხრილში 3.14.

ეს კოეფიციენტი შეიძლება გამოყენებული იყოს რეაგირების ეფექტური დროის გამოსათვლელ ფორმულაში

$$T_{\text{eff}} = \mathcal{F} \cdot V \quad (3.5)$$

სადაც T_{eff} არის რეაგირების ეფექტური დრო, წმ; $\mathcal{F}$ — ეფექტურობის კოეფიციენტი, $\text{წმ}^2/\text{მ}^3$; V — მოცულობა, მ^3 .

ამ შემთხვევაში, $\mathcal{F}$ მოქმედებს როგორც დროის ინტენსიურობის ნორმატორი მოცულობაზე, რაც შეიძლება მოდელირებისას გამოყენებული იყოს სავენტილაციო სისტემის რეაგირების შეფასებისთვის. ამგვარად, აღნიშნული კოეფიციენტი გვიჩვენებს

რამდენი დროის კვადრატი (წმ^2) არის საჭირო ერთ კუბურ მეტრზე (მ^3), რათა ვენტილატორის მიერ წარმოქმნილმა ჰაერის ნაკადმა მოახდინოს ეფექტური გაწმენდა ტოქსიკური მინარევებისაგან ან გამოყოფილი სითბოსაგან.

ფორმულა (3.4) შესაძლებელია წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით

$$\text{ASET}_{\text{matrix}} = t + n \cdot Q \cdot F \quad (3.6)$$

მოცემულ ფორმულაში ნამრავლი $n \cdot Q$ არის ჯამური სავენტილაციო წარმადობა F — მოცულობაზე დაყვანილი დროის ინტენსიურობის კოეფიციენტი, რაც ქმნის დროის შუალედს, რომელიც ემატება დროის საწყის t შუალედს.

კოეფიციენტის პრაქტიკული მნიშვნელობა CFD მოდელირებაში. ეს კოეფიციენტი შეიძლება ემყარებოდეს ემპირიულად მიღებულ მონაცემებს, რომლებიც ასახავს: 1. ჰაერის განახლების სიჩქარეს; 2. ტოქსიკური ნივთიერებების დინამიკას; 3. ვენტილაციის რეაგირების ეფექტიანობას.

ამ შემთხვევაში მოდელირების მიზანი არის ASET-ის შეფასება არა მხოლოდ გეომეტრიის ან ტოქსიკური ზონების მიხედვით, არამედ სისტემის რეაგირების უნარის შესაბამისად და მისი ინტენსიურობის პროპორციულად.

3.8. რეკომენდაციების დამუშავება

დეტალური ანალიზის მიზანი არის ინდექსების სისტემური ანალიზის საფუძველზე შეაფასოს სხვადასხვა სავენტილაციო და ევაკუაციის სტრატეგიის ეფექტიანობა სიცოცხლის, ინფრასტრუქტურისა და ეკონომიკის დაცვის თვალსაზრისით. ინდექსების განმარტება მოცემულია დანართის 3.15 და 3.16 ცხრილებში.

სისტემური ანალიზის ძირითადი დასკვნები:

- SRI ყველაზე მაღალია ტრანსფორმირებად სისტემაში, რაც მიუთითებს სიცოცხლის გადარჩენის მაქსიმალურ შესაძლებლობაზე.
- VRI იზრდება აქტიური და ტრანსფორმირებადი სისტემების შემთხვევაში, რაც აჩვენებს სავენტილაციო სისტემის საიმედოობას.
- ERI მაღალია იმ სტრატეგიებში, სადაც ინფრასტრუქტურის დაზიანება მინიმუმამდეა დაყვანილი.
- IRI ყველაზე მაღალია პასიური ვენტილაციის დროს, რაც მიუთითებს ინფრასტრუქტურის მაღალ საფრთხიანობაზე.
- HFI იზრდება ტრენინგისა და PPE-ს გამოყენებისას, რაც ადამიანური ფაქტორის მართვის ეფექტიანობას აჩვენებს.

რეკომენდაციები პრაქტიკული დონეზე:

1. ვენტილაციის სისტემის მოდერნიზაცია - ტრანსფორმირებადი ელემენტების ინტეგრაცია; ჭავჭავი ვენტილატორების ავტომატური მართვა.
2. CFD და MATLAB მოდელირების რეგულარული გამოყენება - RSET/ASET ანალიზით სარგებლობა; ტოქსიკური ნივთიერებებით გაჯერებული ზონების პროგნოზირება.

3. PPE სტანდარტების გაძლიერება - CO-ისგან დამცავი ნიღბებისა და თერმული ზემოქმედებისაგან დამცავი ტანსაცმლის გამოყენება.

4. ტრენინგების სისტემატიზაცია - ევაკუაციის სცენარების სიმულაცია; პანიკის მართვის ფსიქოლოგიური მოდულების გამოყენება.

5. სტრატეგიული ინდექსების მონიტორინგი - SRI/VRI/ERI/IRI/HFI ინდექსების რეგულარული შეფასება; მონაცემთა ბაზის შექმნა და განახლება.

3.9. დასკვნითი მნიშვნელობები

საქართველოს სივრცითი განვითარების პოლიტიკა, როგორც ეს ასახულია „სივრცის დაგეგმარების გეგმის კონცეფციის“ ტექნიკურ დავალებაში, მიზნად ისახავს ქვეყნის ტერიტორიული განვითარების თანაბარ, მდგრად და ინტეგრირებულ მართვას. ამ მიზნის მიღწევა შეუძლებელია იმ სისტემური რისკების უგულებელყოფით, რომლებიც თან ახლავს კრიტიკულ ინფრასტრუქტურას — განსაკუთრებით ისეთ სტრატეგიულ ობიექტებს, როგორიცაა საავტომობილო გვირაბები. სწორედ ამ კონტექსტში იკვეთება ორი დამოუკიდებელი, მაგრამ ურთიერთდამამტკიცებელი დოკუმენტის — პროფესიული უსაფრთხოების კვლევის მეთოდოლოგიური ანალიზისა და გვირაბის ხანძრის სცენარზე დაფუძნებული მოდელირების — გადამწყვეტი მნიშვნელობა.

სატრანსპორტო ინფრასტრუქტურის უსაფრთხოება, განსაკუთრებით გვირაბების კონტექსტში, წარმოადგენს არა მხოლოდ ტექნიკურ გამოწვევას, არამედ სტრატეგიულ კომპონენტს საქართველოს სივრცითი განვითარების პოლიტიკისთვის. ოთხი დამოუკიდებელი, მაგრამ ურთიერთდამამტკიცებელი დოკუმენტის სინთეზი აჩვენებს, რომ პროფესიული უსაფრთხოების კვლევის მეთოდები — რაოდენობრივი, ხარისხობრივი და შერეული — შეიძლება წარმატებით დაინერგოს სივრცით დაგეგმარების პროცესში.

CFD მოდელირება, MATLAB კოდირება, RSET/ASET ანალიზი და სტრატეგიული ინდექსები ქმნის ტექნიკურ საფუძველს, რომელიც სიცოცხლის რისკის, ინფრასტრუქტურის დაზიანებისა და ეკონომიკური ზემოქმედების რაოდენობრივი შეფასების საშუალებას იძლევა. GIS რუკები, ციფრული ტექნოლოგია და BCR მეთოდით ფინანსური ანალიზი კი ქმნის სივრცით პოლიტიკაზე მორგებულ გადაწყვეტილების მხარდაჭერის სისტემას.

საბოლოოდ, კვლევა ადასტურებს, რომ პროფესიული უსაფრთხოების ინტეგრაცია სივრცით სტრატეგიაში აუცილებელია საქართველოს ტრანზიტული როლის გაძლიერებისთვის, სიცოცხლის დაცვისთვის და ინფრასტრუქტურის მდგრადობის უზრუნველსაყოფად. ეს მიდგომა ქმნის საფუძველს არა მხოლოდ ეროვნული, არამედ რეგიონული და საერთაშორისო დონეზე სტაბილური და უსაფრთხო განვითარებისათვის.

წარმოდგენილი კვლევა არის ყოვლისმომცველი და ინტერდისციპლინური ჩარჩო საგზაო გვირაბის ხანძრის სცენარებში პროფესიული უსაფრთხოების შესაფასებლად. როგორც უკვე აღინიშნა, CFD მოდელირების, MATLAB-ზე დაფუძნებული ევაკუაციის ანალიზისა და სტრატეგიული ინდექსების შეფასების (LRI, IDI, EEI) ინტეგრირებით, იგი ადგენს მყარ მეთოდოლოგიას სიცოცხლის რისკის, ინფრასტრუქტურის დაუცველობისა და ეკონომიკური გავლენის რაოდენობრივი განსაზღვრისთვის. ეფექტურობის კოეფიციენტის შემოღება ახალ მიდგომას გვთავაზობს ვენტილაციის სისტემის რეაგირების შესაფასებლად, რაც ზრდის ASET გამოთვლების სიზუსტეს.

ტრანსფორმირებადი ვენტილაციის სისტემები აჩვენებენ უმაღლეს შესრულებას უსაფრთხო ევაკუაციის დროითი ფანჯრების გაფართოების, ტოქსიკური ზემოქმედების შემცირებისა და გადარჩენის უნარის გაუმჯობესების კუთხით. RSET-ისა და ASET-ის შედარებითი ანალიზი ხაზს უსვამს ტექნიკურ პარამეტრებსა და ადამიანურ ფაქტორებს შორის კრიტიკულ ურთიერთქმედებას, რაც აძლიერებს დინამიკური მოდელირებისა და სცენარზე სპეციფიკური ჩარევების საჭიროებას.

როგორც გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხიდან ჩანს, ამ სტრიქონების ავტორს თანაავტორებთან ერთად 2021 წლიდან აქვს საქართველოს პატენტი „ტრანსფორმირებადი ზღუდარების სისტემა სატრანსპორტო გვირაბებში ხანძრების ლოკალიზაციისა და სიცოცხლისათვის საშიში შედეგების მინიმიზაციისათვის“ [28, 29].

საერთაშორისო სტანდარტებთან (NFPA, ISO, PIARC) შესაბამისობაში მყოფი შემოთავაზებული მეთოდოლოგია მხარს უჭერს სტრატეგიული გადაწყვეტილების მიღებას გვირაბის უსაფრთხოების მართვაში და ხელს უწყობს საქართველოს სივრცითი განვითარების პოლიტიკას. დასკვნები გვთავაზობს ქმედით რეკომენდაციებს ვენტილაციის მოდერნიზაციის, ინდივიდუალური დამცავი აღჭურვილობის გაუმჯობესების, ქვევითი ტრენინგის და სტრატეგიული ინდექსების უწყვეტი მონიტორინგისთვის.

საბოლოო ჯამში, ეს კვლევა ხელს უწყობს შრომის უსაფრთხოებისა და ჯანმრთელობის სფეროს წინსვლას უნივერსალური ანალიტიკური მოდელების დარგის სპეციფიკურ გამოყენებასთან შერწყმით, რაც უზრუნველყოფს, რომ უსაფრთხოების სტრატეგიები იყოს როგორც მეცნიერულად დასაბუთებული, ასევე ოპერატიულად ეფექტური.

დანართი – დამხმარე ცხრილები და მონაცემები

დანართი აერთიანებს კვლევის განმავლობაში მითითებულ ყველა დამხმარე ცხრილს, რომელიც შეიცავს დეტალურ საწყის პარამეტრებს, მოდელირების შედეგებს, სტრატეგიულ ინდექსებსა და სპეციფიკურ მეტრიკას სცენარისთვის. ეს ცხრილები არის რაოდენობრივი საფუძველი CFD სიმულაციებისთვის, RSET/ASET შედარებებისთვის და სტრატეგიული რისკების შეფასებისთვის, რომლებიც განხილულია ძირითად ტექსტში. თითოეული ჩანაწერი სტრუქტურირებულია უსაფრთხოების სპეციალისტებისა და ინფრასტრუქტურის დამგეგმავებისთვის სიცხადის, რეპროდუცირებისა და პრაქტიკული შესაბამისობის გასაზრდელად.

ცხრილი 3.4. რისკის იდენტიფიკაციის მატრიცა

წარმოადგენს გვირაბის ხანძრის ძირითადი რისკების თვისობრივ მიმოხილვას, კატეგორიზებულს ალბათობისა და ზემოქმედების მიხედვით. ემსახურება სცენარების პრიორიტეტულობის განსაზღვრას რაოდენობრივი მოდელირების დაწყებამდე.

რისკის კატეგორია	აღწერა	ალბათობა	გავლენა
ხანძრის გაძლიერება	ავტომობილის წვა, საწვავის აალება	მაღალი	მძიმე
ტოქსიკური კვამლი	CO, Nox და ნაწილაკების გავრცელება	მაღალი	მაღალი
ხილვადობის შემცირება	კვამლით გამოწვეული ხილვადობის შემცირება	საშუალო	მაღალი
ევაკუაციის შეფერხება	საცობები, პანიკა ან გასასვლელების ბლოკირება	საშუალო	მძიმე
ინფრასტრუქტურის დაზიანება	სტრუქტურული დეგრადაცია სითბოს გამო	დაბალი	მძიმე
ეკონომიკური ზარალი	გვირაბის დახურვა, ლოჯისტიკის შეფერხება	საშუალო	საშუალო

ცხრილი 3.5. MATLAB-ის კოდის მონაცემები RSET/ASET შედარებისთვის

წარმოგიდგენთ ევაკუაციის დროის გამოთვლებს MATLAB-ის გამოყენებით. საჭირო და ხელმისაწვდომი დროის ფანჯრების შედარებით, ხაზს უსვამს უსაფრთხო ევაკუაციის შესაძლებლობას.

პარამეტრი	სიდიდე
ხანძრის ზონაში მოქცეული ადამიანების რიცხვი	120
წინასწარი მომზადების დრო ევაკუაციის დაწყებამდე	30 წმ
გადაადგილების სიჩქარე ევაკუაციის დროს	0.8 მ/წმ
მანძილი თავშესაფრამდე	150 მ

ASET - ევაკუაციისთვის ხელმისაწვდომი დრო, გარემოს სიცოცხლისთვის საშიშ დონემდე გაჭუჭყიანებამდე (განსაზღვრულია MATLAB-ის კოდით)	180 წმ
RSET - უსაფრთხო ევაკუაციისთვის აუცილებელი დრო არის დროის ორი შუალედის ჯამი: წინასწარი მომზადების დროს + გადაადგილებაზე საჭირო დრო (განსაზღვრულია MATLAB-ის კოდით)	217.5 წმ
დასკვნა	უსაფრთხო ევაკუაცია შეუძლებელია, რადგან $ASET < RSET$ ($180 < 217.5$)

შენიშვნა: MATLAB კოდის მიხედვით დროის გამოთვლის პროცედურა ნაჩვენებია ფორმულა (1)-ით და მე-11 ცხრილის განმარტებაში. მე-5 ცხრილის მონაცემების მიხედვით უსაფრთხო ევაკუაცია შეუძლებელია, რადგან უსაფრთხო ევაკუაციისათვის აუცილებელი დროის შუალედი (217.5 წმ) უფრო მეტია, ვიდრე აღნიშნული მოქმედებისათვის ხელმისაწვდომი დროის ფანჯარა (180 წმ).

ცხრილი 3.6. ვენტილაციის სტრატეგიისა და რისკების შედარება

ახდენს ვენტილაციის სტრატეგიების კლასიფიკაციას ASET-ის ეფექტურობისა და რისკის შემცირების პოტენციალის მიხედვით. გამოიყენება უსაფრთხოების ინტერვენციების სტრატეგიული შერჩევისთვის.

სტრატეგია	ASET (წმ)	ეფექტურობა	რისკის შემცირება
პასიური	60-120	დაბალი	შეზღუდული
მექანიკური	180-300	საშუალო	სტაბილური
ჰიბრიდული	>300	მაღალი	მაქსიმალური

ცხრილი 3.7. CFD მოდელირების სცენარის პარამეტრები

მოდელირების საწყისი პარამეტრების დასადგენად ხარისხობრივ რისკებს რიცხვით ქულებად გარდაქმნის. მხარს უჭერს სტრუქტურირებული მონაცემებით CFD და MATLAB სიმულაციებს.

პარამეტრი	სიდიდე	ერთეული	აღწერა
გვირაბის სიგრძე	1200	მ	გვირაბის სრული სიგრძე
გვირაბის სიმაღლე	5.5	მ	ვერტიკალური კლირენსი
ხანძრის კერის განლაგება	400	მ შესასვლელიდან	ანთების პოზიცია
სითბოს გამოყოფის მაჩვენებელი (სგმ)	30	მგვტ	მოდელირებაში გამოყენებული სგმ-ის პიკი

ვენტილაციის სიჩქარე	2.5	მ/წმ	Initial airflow velocity
გარე ტემპერატურა	15	°C	External air temperature

ცხრილი 3.8. MATLAB მოდელზე მიღებული ASET-ის რიცხვითი სიდიდეები წამებში
აჩვენებს მოდელირებულ ASET მნიშვნელობებს სხვადასხვა ვენტილატორის სიმძლავრისა და კონფიგურაციისთვის. იძლევა უსაფრთხო ევაკუაციის დაპროექტების ზღურბლებს.

ვენტილატორის წარმადობა Q , მ ³ /წმ	ვენტილატორების რიცხვი $n = 2$	ვენტილატორების რიცხვი $n = 3$	ვენტილატორების რიცხვი $n = 4$
5	45	67.5	90
10	90	135.0	180
15	135	202.5	270

ცხრილი 3.9. ევაკუაციის მოდელირების პარამეტრები

ჩამოთვლილია საწყისი ცვლადები CFD სიმულაციებისთვის, მათ შორის ხანძრის ინტენსიურობა, გვირაბის გეომეტრია და ჰაერის ნაკადის პირობები.

პარამეტრი	სიდიდე	ერთეული	შენიშვნა
ადამიანების სიმჭიდროვე	0.8	პერსონა/მ ²	საშუალო სიმჭიდროვე ევაკუაციის ზონაში
გადაადგილების სიჩქარე	1.2	მ/წმ	მოდრაობის საშუალო სიჩქარე
რეაგირების დრო	30	წმ	შეფერხება ევაკუაციის დაწყებამდე
გასასვლელის სიგანე	1.5	მ	საგანგებო გასასვლელის სიგანე
გამჭვირვალობის ზღურბლი	10	მ	მოდრაობისთვის საჭირო მინიმალური ხილვადობა
ტოქსიკურობის ზღურბლი	2500	ppm CO	CO-ს მაქსიმალური დასაშვები კონცენტრაცია

ცხრილი 3.10. MATLAB-ის კოდის მონაცემები RSET/ASET შედარებისთვის

დეტალურად აღწერს ევაკუაციის დროის კომპონენტებს (რეაქციას, მოძრაობას) და აღარებს მათ ASET-ს სხვადასხვა კონფიგურაციის შემთხვევაში.

ხანძრის ზონაში მოქცეული ადამიანების რიცხვი	120
წინასწარი მომზადების (რეაგირების) დრო ევაკუაციის დაწყებამდე	$t = 45$ წმ
გადაადგილების სიჩქარე ევაკუაციის დროს	$U = 0.9$ მ/წმ
მანძილი თავშესაფრამდე	$L = 120$ მ
მოძრაობის შეფერხება	$k = 1.2$
ეფექტურობის კოეფიციენტი	$\mathcal{F} = 4.5$ წმ ² /მ ³
ASET - ევაკუაციისთვის ხელმისაწვდომი დრო, გარემოს სიცოცხლისთვის საშიშ დონემდე გაჭუჭყიანებამდე (განსაზღვრულია MATLAB-ის კოდით)	180 წმ
RSET - უსაფრთხო ევაკუაციისთვის აუცილებელი დროის შუალედი, წინასწარი რეაგირების დროს + გადაადგილების დრო (განსაზღვრულია MATLAB-ის კოდით)	205 წმ
უსაფრთხო ევაკუაცია შეუძლებელია, რადგან $ASET < RSET$	$180 < 205$

ცხრილი 3.11. ვენტილაციის სტრატეგიის შედარება

ASET-ის თავსებადობისა და სტრატეგიული ეფექტურობის თვალსაზრისით ერთმანეთთან ადარებს გრძივ, განივ და ტრანსფორმირებად სისტემებს.

სტრატეგია	აღწერა	ASET-ის გავლენა	RSET-ის თავსებადობა	შენიშვნა
გრძივი	ცალმხრივი ჰაერის ნაკადი გვირაბის ღერძის გასწვრივ	საშუალო	თავსებადი	საჭიროა მაღალი სიმძლავრის ვენტილატორი
განივი	გვირაბის მონაკვეთებით მიწოდებული და არინებული ჰაერი	მაღალი	მაღალი თავსებადობა	საჭიროა კომპლექსური ინფრასტრუქტურა
ნახევრად-განივი	გრძივისა და განივის კომბინაცია	მაღალი	თავსებადი	ხანძრის ადგილისადმი ადაპტირება
ტრანს-ფორმირებადი	სცენარზე დაფუძნებული გადართვა რეჟიმებს შორის	ძალიან მაღალი	მაღალი თავსებადობა	ზრდის აეროდინამიკურ წინააღმდეგობას და აფერხებს ტოქსიკური ნივთიერებების გავრცელებას

ცხრილი 3.12. სტრატეგიული ინდექსის ზღვრები და ინტერპრეტაცია

განსაზღვრავს LRI-ის, IDI-ის და EEI-ის ინტერპრეტაციის დიაპაზონებს. გამოიყენება სიცოცხლის რისკის, ინფრასტრუქტურის დაზიანებისა და ეკონომიკური ზემოქმედების შესაფასებლად.

ინდექსი	ზღვრების დიაპაზონი	ინტერპრეტაცია	რეკომენდებული მოქმედება
LRI	0 – 5 %	სიცოცხლის დაბალი რისკი	მიმდინარე ევაკუაციის სტრატეგიის შენარჩუნება
	5 – 15 %	სიცოცხლის საშუალო რისკი	ხილვადობისა და ტოქსიკურობის ზღვრების გადახედვა
	>15 %	სიცოცხლის მაღალი რისკი	ევაკუაციისა და ვენტილაციის გეგმის ხელახლა შემუშავება
IDI	0 – 10 %	ინფრასტრუქტურული მცირე დაზიანება	რეგულარული ტექნიკური მომსახურება
	10 – 30 %	საშუალო დაზიანება	ნაწილობრივი რეკონსტრუქცია
	>30 %	ძლიერი დაზიანება	სრული სტრუქტურული შეფასება
EEI	0 – 5 %	მცირე ეკონომიკური გავლენა	მოქმედება საჭირო არ არის
	5 – 20 %	საშუალო გავლენა	ბიუჯეტის გადანაწილება
	>20 %	მაღალი ეკონომიკური გავლენა	საგანგებო დაფინანსება და პოლიტიკის გადახედვა

ცხრილი 3.13. პარამეტრების ზეგავლენა ASET და RSET-ზე

აჯამებს ევაკუაციის შესაძლებლობაზე მოქმედ ტექნიკურ და ქცევით ცვლადებს. ხელმძღვანელობს ოპტიმიზაციის სტრატეგიებს.

პარამეტრი	ტიპი	გავლენა ASET-ზე	გავლენა RSET-ზე	შენიშვნა
ვენტ. წარმად. Q , მ ³ /წმ	ტექნიკური	↗ ზრდის ASET	-	მეტი ჰაერის ნაკადი = სწრაფი კვამლის არინება
ვენტ. რიცხვი, n	ტექნიკური	↗ ზრდის ASET	-	მეტი ვენტილატორი = მეტი საერთო წარმადობა
ვენტილატორის მქ, η	ემპირიული	↗ ზრდის ASET	-	დამოკიდებულია ვენტილატორის ტიპზე და განლაგებაზე
კვამლის დამორება იატაკიდან, δ	გარემო	↗ ზრდის ASET	-	მაღლა განლაგებული ფენა = უკეთესი ხილვადობა
შეფერხება მოძრაობის დაწყებამდე, წმ	ქცევითი	-	↗ ზრდის RSET	პანიკის, რეაგირების დრო

გადაადგილების სიჩქარე, მ/წმ	ქვევითი	-	↘ ამცირებს RSET	მაღალი სიჩქარე = სწრაფი ევაკუაცია
მოძრაობის შეფერხების კოეფიცი. (k)	ქვევითი	-	↗ ზრდის RSET	შეფერხებული მოძრაობა = მეტი დრო
გადაადგილების მანძილი, მ	გეომეტრიული	-	↗ ზრდის RSET	ევაკუაციის სივრცემდე მანძილი

ცხრილი 3.14. $\mathcal{F}$ კოეფიციენტის მნიშვნელობები ვენტილაციის ტიპების მიხედვით

წარმოადგენს სხვადასხვა სისტემებისთვის რეკომენდებულ $\mathcal{F}$ მნიშვნელობებს. ხელს უწყობს აეროდინამიკური წინააღმდეგობის და ტოქსიკური კლირენსის მოდელირებას.

ვენტილაციის ტიპი	ცვალებადობის ფარგლები, $\text{წმ}^2/\text{მ}^3$	სარგებლობის წესი	შენიშვნა
პასიური	$1.0 \leq \mathcal{F} \leq 2.5$	ბუნებრივი კონვექცია	შეზღუდულია მაღალი ტოქსიკურობის ან დაბალი ხილვადობის სცენარებში
აქტიური	$3.0 \leq \mathcal{F} \leq 6.0$	მექანიკური ვენტილაცია	უზრუნველყოფს ASET-ის საკმარის ფანჯარას
ტრანსფორმირებადი	$4.0 \leq \mathcal{F} \leq 7.0$	ტრანსფორმირებადი ელემენტების ჩართვა ვენტილაციაში	აფერხებს ტოქსიკური აირების გავრცელებას

ცხრილი 3.15. სტრატეგიული ინდექსების განმარტებები

აჩვენებს SRI, VRI, ERI, IRI და HFI-ის გამოთვლილ მნიშვნელობებს მოდელირებული სცენარების მიხედვით. შესაძლებელს ხდის შედარებითი შეფასების განხორციელებას.

აბრევიატურა	სრული ტერმინი	განმარტება
LRI	სიცოცხლის რისკის ინდექსი	მიუთითებს ხანძრის ზონაში მყოფ პირებს შორის დაღუპულთა პროცენტულ მაჩვენებელს; გამოითვლება როგორც $\frac{N_{fatalities}}{N_{exposed}} \cdot 100\%$
IDI	ინფრასტრუქტურის დაზიანების ინდექსი	მიუთითებს ინფრასტრუქტურის დაზიანების მასშტაბზე; გამოითვლება როგორც $\frac{C_{damage}}{C_{total}} \cdot 100\%$

EI	ეკონომიკური ეფექტის ინდექსი	მიუთითებს ინფრასტრუქტურის შეფერხებით გამოწვეულ ეკონომიკურ ზეგავლენაზე; გამოითვლება როგორც $\frac{T_{\text{downtime}} \cdot R_{\text{loss}}}{GDP_{\text{sector}}} \cdot 100\%$
-----------	-----------------------------	---

ცხრილი 3.16. ინდექსების განმარტება

აკავშირებს სტრატეგიულ ინდექსებს ქმედით უსაფრთხოების რეკომენდაციებთან. ხელს უწყობს გვირაბის დიზაინისა და საგანგებო სიტუაციების დაგეგმვის შესახებ გადაწყვეტილების მიღებას.

ინდექსი	აღწერა
SRI – Survival Risk Index	სიცოცხლის გადარჩენის ალბათობა RSET/ASET თანაფარდობის მიხედვით
VRI – Ventilation Reliability Index	სავენტილაციო სისტემის ეფექტიანობა და სტაბილურობა
ERI – Economic Resilience Index	ინფრასტრუქტურის დაზიანების გავლენა ეკონომიკურ მდგრადობაზე
IRI – Infrastructure Risk Index	ინფრასტრუქტურის დაზიანების რისკი თერმული დატვირთვისა და მასალების მდგრადობის მიხედვით
HFI – Human Factor Index	ადამიანური ქცევის, ტრენინგის და PPE გამოყენების გავლენა უსაფრთხოებაზე

ნაშრომი შესრულებულია შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით. გრანტის ნომერი FR-22-12949.

გრანტის მეცნიერი ხელმძღვანელი, პროფ. ომარ ლანჩავა

ლიტერატურა

1. საქართველოს სივრცის დაგეგმარების გეგმის კონცეფცია (NSDC). სსიპ სივრცითი და ქალაქმშენებლობითი განვითარების სააგენტო. თბილისი, გვ. 60, 2025.
2. Lanchava, O., Ilias, N., Nozadze, G., Radu, S.M., Moraru, R.I., Khokerashvili, Z., Arudashvili N. FDS Modelling of the Piston Effect in Subway Tunnels. Environmental Engineering and Management Journal. 18(4), 2019, 317-325.
3. Lanchava, O., Ilias, N. Critical velocity analysis for safety management in case of tunnel fire, 2020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202030500023>
4. Lanchava, O., Ilias, N., Radu, S.M., Jangidze, M., Khokerashvili, Z. Fire development study on physical models of transport tunnels, 2021. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134203020>
5. 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, 38-45.
6. Lanchava, O., Ilias, N., Radu, S.M., Nozadze, G., Tsanova D. Analysis of the use of transformable elements in intelligent tunnel ventilation systems, 2022.
7. NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, 2020, National Fire Protection Association.
8. PIARC, Road Tunnel Operations Guidelines, World Road Association, 2019.
9. EN 12101-6: Smoke and heat control systems – Part 6, Specifications for pressure differential systems, European Committee for Standardization, 2018.
10. ISO 13943, Fire Safety Vocabulary, International Organization for Standardization, 2017.
11. საქართველოს ტექნიკური რეგლამენტები გზებისა და გვირაბების უსაფრთხოების შესახებ, 2019, საქართველოს მთავრობის დადგენილება.
12. საქართველოს საგანგებო სიტუაციების მართვის სააგენტო, მეთოდოლოგიური ინსტრუქციები საგანგებო სიტუაციებისათვის, 2022.
13. Lanchava, O., Abashidze, G., Tsverava, D. Securing fire safety for underground structures. Quality Access to Success. 18(S1), 2017, 47-50.
14. Lanchava, O., Ilias, N., Nozadze, G. Some problems for assessment of fire in road tunnels. Quality Access to Success. 18(S1), 2017, 69-72.

15. Lanchava, O., Ilias, N., Nozadze, G., Radu, S.M., Moraru, R.I., Khokerashvili, Z., Arudashvili N. 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, 342-352.
16. TRANS/AC 7/9. Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels, Economic and Social Council, Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels, 2001. On line at: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2002/ac7/TRANS-AC7-09e.pdf>
17. TRANS/AC 7/11. Report of the AD HOC Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels on its Fifth Session, Economic and Social Council, Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels, 2002. On line at: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2002/ac7/TRANS-AC7-11e.pdf>
18. Bird A., Carvel R. Handbook of Tunnel Fire Safety. Second edition, 2012. *Thomas Telford Limited*, 694.
19. Thomas P.H. The movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires, 1958. *Fire Research Notes* 351. <http://www.iafss.org/publications/frn/351/-1>
20. Lanchava O.A. Heat and Mass Exchange in Permanent Mine Workings. *Soviet Mining Science*, **18**, 529–532. Novosibirsk, 1982, <https://doi.org/10.1007/BF02528377>.
21. 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. ეს უნდა დავამატო
22. 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. ეს უნდა დავამატო
23. 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.
24. Lanchava O.A. Hygroscopic heat and mass transfer in underground structures. GTU, 1998, Tbilisi
25. Vaitkevicius A., Carvel R. Investigating the Throttling Effect in Tunnel Fires. *Fire Technology*, Vol. 52, 2016, pp. 1619–1628.
26. 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.
27. Lanchava O. Some Considerations on Universal Research Methods in the Field of Occupational Safety. *Georgian Scientists* 102(4), 2025.

28. ომარ ლანჩავა, გიორგი ნოზაძე, მარად ჯანგიძე. ტრანსფორმირებადი ზღუდარების სისტემა სატრანსპორტო გვირაბებში ხანძრების ლოკალიზაციისა და სიცოცხლისათვის საშიში შედეგების მინიმიზაციისათვის. საქართველოს პატენტი P 2022 7371, „საქპატენტი“, სამრეწველო საკუთრების ოფიციალ. ბიულეტენი. 2021 12 10.
29. Lanchava O., Ilias N., Radu S.M., Nozadze G., Tsanava D. Analysis of the Use of Transformable Elements in Intelligent Tunnel Ventilation Systems. *MATEC Web of Conferences* 354, 00020, 2022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202235400020>
30. 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.
31. 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.
32. Lanchava O., Nozadze G., Tsanava 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.
33. 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).
34. თეიმურაზ კუნჭულია, ომარ ლანჩავა, მზია ქიტოშვილი. შრომის უსაფრთხოება სამთო საწარმოებში. მეორე შევსებული და გადამუშავებული გამოცემა. საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბილისი, 2024, გვ. 390.
35. თეიმურაზ კუნჭულია, ომარ ლანჩავა, მზია ქიტოშვილი. შრომის უსაფრთხოება გეოდეზიური და საკადასტრო სამუშაოების შესრულების დროს. საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბილისი, 2023, გვ. 220.