



რიცხვითი ანალიზის მიხედვით დგუშის ეფექტის გამოვლინების ხასიათი მეტროს გვირაბებში

ომარ ლანჩავა*, გიორგი ნოზაძე

*ნაშრომი შესრულებულია შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის საგრანტო დაფინანსებით. გრანტის ნომერი 216968.

ნაშრომში რიცხვითი ანალიზით შეფასებულია მეტროს გვირაბებში დგუშის ეფექტით აღძრული ნაკადები მატარებლის სიჩქარის, გვირაბისა და მატარებლის გეომეტრიის, აღძრული ნაკადების სახეობებისა და სხვა ცვალებადი მახასიათებლების მიხედვით. ნაჩვენებია, რომ მეტროს გვირაბებში მატარებლების მოძრაობით განპირობებული დგუშის ეფექტისათვის დამახასიათებელია ორი ფაზის არსებობა. პირველ ფაზაში დგუშის ეფექტი ხასიათდება არასტაციონარულობით, ხოლო მეორე ფაზაში პროცესი სტაბილიზდება. ცირკულაციური ნაკადების სიჩქარეთა კორექტულად დადგენისათვის აუცილებელია აღნიშნული ფაზების გავლენის მხედველობაში მიღება. დგუშის ეფექტით აღძრული ცირკულაციური ნაკადის სიჩქარე, არსებით ცვალებადობას განიცდის პროცესის არასტაციონარულობის ხარისხის გათვალისწინებით მეტროს გვირაბების საშუალო სტატისტიკური სიგრძის (1200 მ) და მატარებლის ნომინალური სიჩქარის 30 -50 კმ/სთ შემთხვევაში.

საკვანძო სიტყვები: მიმწყდომი ნაკადი; ცირკულაციური ნაკადი; ღრეჩოში გადადინებული ნაკადი; მატარებლის სიჩქარე.

მეტროს გვირაბებში ჰაერის განაწილების, უსაფრთხოებისა და მგზავრთა კომფორტის თვალსაზრისით ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ფაქტორია მატარებლების მოძრაობის დგუშის ეფექტი, რომელიც მრავალმხრივ შესწავლას საჭიროებს. აღსანიშნავია, რომ დგუშის ეფექტით შესაძლებელია ჰაერის უკონტროლო ნაკადების მოხვედრა მიწისქვეშა სივრცეში და ეს განსაკუთრებით შეეხება მცირე სიღრმეზე განლაგებულ სადგურებსა და გადასარბენებს. აღნიშნულიდან გამომდინარე, დგუშის ეფექტის შესწავლა აქტუალური, თანამედროვე პრობლემაა, რომელიც მეცნიერთა და ინჟინერთა დიდ ყურადღებას იქცევს უკანასკნელ პერიოდში.



აღნიშნული საკითხის შესწავლისადმი მიძღვნილი თეორიულ და ექსპერიმენტულ ნაშრომებში [1-4], გამოყენებულია მიდგომა, როცა დენადი გარემო გადაადგილდება უძრავი მატარებლის მიმართ. ანალოგიური მიდგომა განხორციელებული ბოლო პერიოდის ნაშრომებშიც, ხოლო კვლევებისათვის გამოიყენება რიცხვითი ანალიზის სხვადასხვა (CFD, FDS) მეთოდები [5-12]. ამ ნაშრომებიდან [5-8] და ნაწილობრივ [9] მიძღვნილია ვენტილაციის ოპტიმალურობის საკითხების გადაწყვეტისადმი, უკანასკნელ ნაშრომში შესწავლილია ვენტილაციის ტექნოლოგიური მაჩვენებლები, როცა მატარებლით გვირაბის შევსების კოეფიციენტი შეადგენს 0.25. ნაშრომში [7] ნაჩვენებია დგუშის ეფექტით გამოწვეული მაღალი და დაბალი წნევის ზონების გავლენა მეტროს ვენტილაციის შესაძლებლობაზე, რიცხვითი მოდელირების სასაზღვრო პირობები ცვალებადია ნაშრომში [8], ხოლო მეტროს გვირაბები აღჭურვილია ერთი ან ორი ვერტიკალური შახტით. გამოთვლითი ჰიდროდინამიკის მეთოდი (CFD) სრულმასშტაბიან მოდელებზე გამოყენებულია ნაშრომში [10]. ნაჩვენებია აგრეთვე [11], რომ იგივე მეთოდი გამოსაყენებელია ჰაერის სიჩქარისა და ტემპერატურის პროგნოზისათვის. ნაშრომი [12] შესრულებულია 1:8 მასშტაბის მოდელზე.

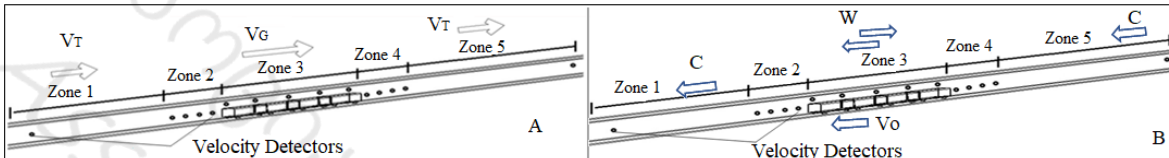
ნაშრომებში [13-17] განხილულია ხანძრის აღმოჩენისა და ხანძარსაწინააღმდეგობის სადგურებსა და სატრანსპორტო გვირაბებში. აგრეთვე განხილულია დგუშის ეფექტით ტოქსიკური მინარევების მიწისქვეშ გავრცელებისა და დგუშის ეფექტით გამოწვეული ჰაერის გამჭოლი ნაკადების შესუსტების საკითხები.

წინამდებარე ნაშრომში შესრულებული კვლევები და აქ წარმოდგენილი შედეგები მკაფიოდ აჩვენებენ დგუშის ეფექტით განპირობებული ჰაერის ნაკადების ადეკვატური განსაზღვრის მიზნით მიწისქვეშ მიმდინარე პროცესების არასტაციონარული და სტაციონარული ფაზების ერთმანეთისაგან გამიჯვნის საჭიროებას და პროცესის არასტაციონარულობის ხარისხის გათვალისწინებას.

მოცემულია მოდელირებულ ამოცანაში მატარებელზე მიმწყდომი ნაკადი V_T , რომელიც გადაედინება მატარებლისა და გვირაბის პერიმეტრებს შორის არსებულ

დრეჩოში V_G სიჩქარით და ნაკადის უწყვეტობის პირობიდან გამომდინარე, ვრცელდება მატარებლის უკან V_T სიჩქარით.

მეტროს გვირაბში მატარებლის მოძრაობის კომპიუტერული მოდელირებით მიღებული შედეგებით სარგებლობისათვის საჭიროა წარმოვიდგინოთ აბსოლუტური და ფარდობითი სიჩქარეების განაწილების სურათები გვირაბში (იხ. ნახ. 1).



ნახ. 1. სიჩქარეების სქემა უძრავი და მოძრავი მატარებლის შემთხვევაში:

A - მოდელირებული ნაკადები: V_T - მიმწყდომი; V_G - გადადინებული; B - რეალური ნაკადები: V_0 - მატარებლის სიჩქარე; C - ცირკულაციური ნაკადის სიჩქარე; W - ნაკადის სიჩქარე დრეჩოში.

V_0 სიჩქარით მოძრავი მატარებელი C სიჩქარით წინ წაიგდგებს ცირკულაციურ ნაკადს და წარმოქმნის აგრეთვე იმავე C სიჩქარით გადაადგილებად მიღვენებულ ნაკადს მატარებლის უკან. მატარებლისა და გვირაბის პერიმეტრებს არსებულ სივრცეში ადგილი აქვს ჰაერის გადადინებას W სიჩქარით. აღნიშნული სიჩქარე დამოკიდებულია მატარებლის თავსა და ბოლოში წნევათა სხვაობაზე, აგრეთვე მატარებლის მოძრაობით გამოწვეულ ექვეციაზე.

ზემოაღნიშნული ფაქტორების კონკრეტული მნიშვნელობებიდან გამომდინარე, W სიჩქარის ვექტორი შესაძლებელია მიმართული იყოს როგორც მატარებლის მოძრაობის, ისე მისი საპირისპირო მიმართულებით.

გვირაბის მატარებლით შევსების α კოეფიციენტის გაანგარიშება შესაძლებელია ფორმულით

$$\alpha = \frac{F}{f}; \quad 1)$$

სადაც F არის მატარებლის ვაგონის მიდელური კვეთის ფართობი, მ²; f - გვირაბის განივკვეთის ფართობი, მ².



შემოვიტანოთ აღნიშვნა

$$\omega = \frac{V_T}{V_0}; \quad (2)$$

სადაც V_T არის მატარებელზე მიმწყდომი ნაკადის სიჩქარე, მ/წმ; V_0 - მატარებლის მოძრაობის სიჩქარე, მ/წმ.

მითითებულ სიჩქარეებს შორის ადგილი აქვს დამოკიდებულებებს:

$$V_T = V_0 - C; \quad (3)$$

$$V_G = V_0 \pm W. \quad (4)$$

უწყვეტობის განტოლებიდან გამომდინარე f და $(f - F)$ განვიკვეთებისათვის და ფორმულა (1)-ის მხედველობაში მიღებით

$$V_T f = V_G (f - F); \quad (5)$$

$$V_G = \frac{V_T}{(1 - \alpha)}. \quad (6)$$

როგორც მოდელირების, ისე რეალურ პირობებში ფორმულით (5) შესაძლებელია გადადინებული ნაკადის სიჩქარის გაანგარიშება.

რიცხვითი მოდელირების შედეგები ჰაერის სიჩქარისათვის მატარებლის წინ და ღრეჩოში გადადინებული ჰაერის ნაკადისათვის მოცემულია ნახ. 2-ზე, რომლიდანაც ჩანს, რომ სავენტტილაციო ნაკადების განვითარების დინამიკა პრაქტიკულად შესაძლებელია ორ ფაზად გაიყოს, I – არასტაციონარული ფაზა და II – სტაციონარული ფაზა. აღნიშნული ფაზები ახასიათებს აგრეთვე ჰაერის ყველა ნაკადს, რომელიც აღიძვრება მოძრავი მატარებლის დგუმის ეფექტით.

მატარებელზე მიმწყდომი ნაკადის V_T სიჩქარესა და მატარებლის V_0 სიჩქარეს შორის ადგილი აქვს დამოკიდებულებას [1]

$$\frac{V_T}{V_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(1 - \alpha) \sqrt{\xi_T \frac{f}{F_w} \frac{1 - \alpha}{1 + 0.004n \frac{S_w}{F_w}}}}}. \quad (7)$$

გვირაბის სრული წინაღობის კოეფიციენტი იანგარიშება ფორმულით

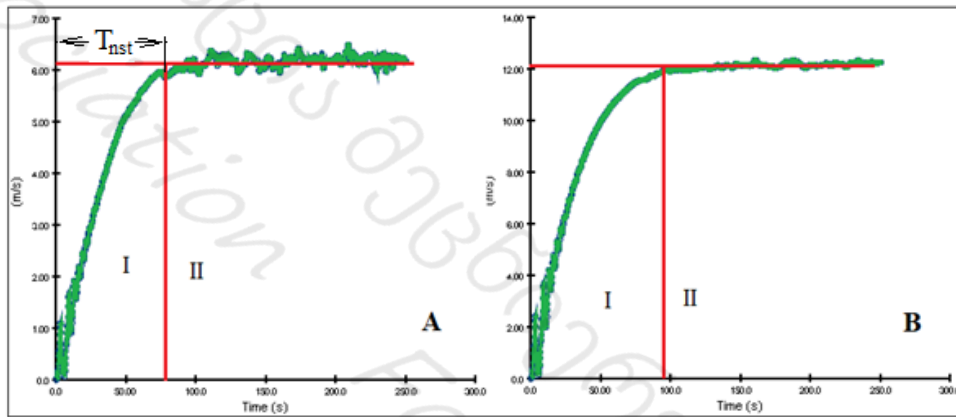
$$\xi_T = 1.5 + 0.007 \frac{l-L}{R}; \quad (8)$$

სადაც l არის გვირაბის სიგრძე, მ; $l = 1200$; L - მატარებლის სიგრძე, მ; $L = 80$.

ვაგონის ეკვივალენტური ფართობი იანგარიშება შუბლური წინაღობის კოეფიციენტის სიდიდის გათვალისწინებით

$$F_w = c_w F; \quad (9)$$

სადაც c_w არის ვაგონის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტი.



ნახ. 2. მიმწყდომი ნაკადის სიჩქარის ცვალებადობა დროში, როცა მატარებლის (სიგრძე $L = 80$ მ) პირველი ვაგონი სადგურისა და გვირაბის შეუღლების ადგილიდან დაშორებულია 130 მ-ით: A – მიმწყდომი ნაკადის ცვალებადობის ხასიათი; B - სიჩქარის ცვალებადობის ხასიათი ღრეჩოში; I – არასტაციონარული ფაზა; II – სტაციონარული ფაზა; მოდელირების დრო - 600 წმ; T_{nst} - არასტაციონარული ფაზის ხანგრძლივობა, წმ.

ფორმულის (2) გათვალისწინებით მატარებლის სიჩქარის საანგარიშო ფორმულა მიიღებს სახეს

$$V_0 = \frac{V_T}{\omega}; \quad (10)$$

ფორმულის (3) გათვალისწინებით მიიღება ცირკულაციური ნაკადის სიჩქარის საანგარიშო ფორმულა

$$C = V_0(1 - \omega). \quad (11)$$



დგუშის ეფექტით აღძრული ჰაერის ხარჯი შესაძლებელია განისაზღვროს ფორმულით

$$Q = Cf. \quad (12)$$

დგუშის ეფექტით აღძრული დინამიკური ნაკადისა და მატარებლის სიჩქარეს შორის (11) ფორმულით გამოხატული ფუნქციური დამოკიდებულების მხედველობაში მიღებით აღძრული ჰაერის ხარჯის ანგარიში უნდა განხორციელდეს არასტაციონარული ფაზის გათვალისწინებით, რასაც ადრე, ტრადიციულად, მხედველობაში არ ღებულობდნენ. აღნიშნული ანგარიში სრულდებოდა მხოლოდ სტაციონარულ ფაზის მონაცემების მიხედვით.

ასეთი მიდგომის აუცილებლობა მიზანშეწონილია განვიხილოთ მეტროს გადასარბენების საშუალო სტატისტიკური სიგრძისა და დგუშის ეფექტის განვითარების დროის მიხედვით. დგუშის ეფექტის ხანგრძლივობის გამოსათვლელად საჭიროა გავითვალისწინოთ ნომინალურ სიჩქარემდე მისაღწევად აჩქარების (შენელების) დრო და ის გარემოება, რომ დგუშის ეფექტის მოქმედება პრაქტიკულად წყდება მატარებლის სადგურში შემოსვლის მომენტში.

$$T_p = T_{tr} - \frac{3}{2}t_{tr} = T_{tr} - \frac{3V_{0i}}{2a}; \quad (13)$$

სადაც, T_p - არის დგუშის ეფექტის მოქმედების ხანგრძლივობა, წმ; T_{tr} - არის მატარებლის მოძრაობის სრული დრო ორ მეზობელ სადგურს შორის, წმ; t_{tr} - მატარებლის აჩქარების (შენელების) ფაზის ხანგრძლივობა, წმ; V_{0i} - მატარებლის მოდელირებული სიჩქარეები, მ/წმ; a - მატარებლის აჩქარება, მ/წმ²; თბილისის მეტროსათვის $a = 1$ მ/წმ².

დგუშის ეფექტის დასახასიათებლად შესაძლებელია შემოვიღოთ პროცესის არასტაციონარულობის მაჩვენებელი უგანზომილებო კოეფიციენტი.

$$K = T_{nst} / T_p; \quad (14)$$

სადაც, K - პროცესის არასტაციონარულობის მაჩვენებელი კოეფიციენტი; T_{nst} - პროცესის არასტაციონარული ფაზის ხანგრძლივობა, წმ.



დგუშის ეფექტის გამოვლენის რეალური პროცესები მიმდინარეობენ არასტაციონარული და სტაციონარული ფაზების ხანგრძლივობათა სხვადასხვა თანაფარდობით, რაზედაც დამოკიდებულია ჰაერის მოცულობითი ხარჯის სიდიდე. ამ უკანასკნელის გაანგარიშება შესაძლებელია ქვემოთ მოცემული უტოლობების მიხედვით:

$K \geq 1$ - პროცესი მიმდინარეობს მხოლოდ არასტაციონარულ ფაზაში;

$K < 1$ - პროცესი შერეული ხასიათისაა (მიმდინარეობს ორივე ფაზაში);

$K \ll 1$ - პროცესი შეგვიძლია ჩავთვალოთ სტაციონარულად.

თუ $K \geq 1$, მაშინ სავენტილაციო ჰაერის მოცულობითი ხარჯი იანგარიშება ფორმულით

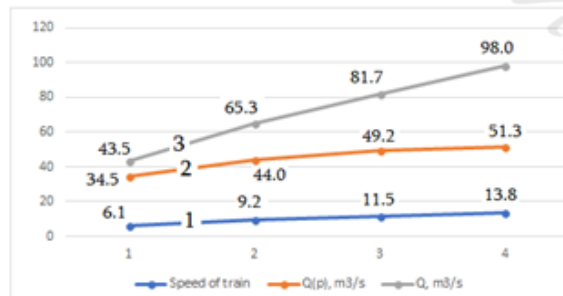
$$Q_p = f C_i / 2 ; \quad (15)$$

თუ $K < 1$,

$$Q_p = f C_i \left(1 - \frac{K}{2} \right); \quad (16)$$

თუ $K \ll 1$. სავენტილაციო ჰაერის მოცულობითი ხარჯი უნდა გაანგარიშდეს წინამდებარე კვლევების შესრულებამდე ცნობილი ფორმულით (12).

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, (11)-(16) ფორმულების გამოყენებით შესაძლებელია დგუშის ეფექტით აღძრული სავენტილაციო ჰაერის ხარჯის გაანგარიშების დროს გათვალისწინებული იქნეს პროცესის არასტაციონარულობა, რაც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს საბოლოო შედეგებზე. ძირითადი შედეგები გრაფიკულად წარმოდგენილია ნახაზზე 3.



ნახ. 3. დგუშის ეფექტით აღძრული ჰაერის ხარჯი მატარებლის სიჩქარის მიხედვით:

1 - მატარებლის სიჩქარე, მ/წმ; 2, 3 - ჰაერის ხარჯი ხარჯები K კოეფიციენტის მხედველობაში მიღებით და მის გარეშე.

წარმოდგენილი კვლევების ძირითადი შედეგია დგუშის ეფექტით აღძრული ჰაერის ნაკადების დახასიათება პროცესის არასტაციონარულობის ხარისხის გათვალისწინებით, რაც გამოწვეულია პროცესების განვითარების არასტაციონარული და სტაციონარული ფაზების არსებობით. ნაჩვენებია, რომ დგუშის ეფექტით აღძრული ნაკადების გაანგარიშების დროს მეტროს გვირაბების საშუალო სტატისტიკური სიგრძისათვის (1200 მ) და მეტროს შემადგენლობის 30 – 50 კმ/სთ ნომინალური სიჩქარის დროს ადგილი აქვს დგუშის ეფექტით აღძრული სავენტილაციო ნაკადის არასტაციონარული ფაზის მნიშვნელოვან გავლენას გადაადგილებული ჰაერის მოცულობების (ხარჯების) დადგენისათვის. პროცესის არასტაციონარულობის გათვალისწინებლობის შემთხვევაში, ჰაერის ხარჯის განსაზღვრაში, მოსალოდნელია 25-45%-მდე ცდომილების დაშვება.

ლიტერატურა

1. G.N. Abramovich, (1991), Applied gas dynamics, *Nauka, Moscow (Russian)*, 600 p.
2. V.Ya. Tsodikov, (1975), Subway ventilation and heat supply systems, *Nedra, Moscow*, 568 p.
3. S. Pan, L. Fan, J.Liu, J. Xie, Y.Sun, N. Cui, L. Zhang, and B. Zheng, (2013), A Review of the Piston Effect in Subway Stations. *Hindawi Publishing Corporation, Advances in Mechanical Engineering, Article ID 950205, 7 pages.*
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/950205>.
4. S.S. Xu, (1987), Piston wind and environmental conditions in the tunnel, *Electric Appliances*, no. 3, pp. 42–47.
5. M.L. González, M.G. Vega, J.M.F. Oro, and E.B. Marigorta, (2014), Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, Volume 40, pp. 22-37.
6. C. Lin, Y.K. Chuah, and C. Liu, (2008), A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system. *Applied Thermal Engineering*, 28(5–6), pp 372–379.
7. F. Wang, M. Wang, S. He, and Y. Deng, (2011), Computational study of effects of traffic force on the ventilation in highway curved tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, Volume 26, issue 3, pp. 481–489.
8. W. Yan, G. Naiping, W. Lihui, and W. Xiping, (2014), A numerical analysis of airflows caused by train-motion and performance evaluation of a subway ventilation system. *Volume 23, issue 6*, pp. 854-863.
9. O. Lanchava, N. Ilias, G. Nozadze, S. Radu, R. Moraru, Z. Khokerashvili, and N. Arudashvili, (2017), The Impact of the Piston Effect on the Technological Characteristics of Ventilation in the Subway Tunnels. *In Proceedings of 8th International Symposium “Occupational Health and Safety” SESAM-2017*, Volume 2, Bucharest, Romania, pp. 342-352.



10. P. Xue, S. You, J. Chao, and T. Ye, (2014), Numerical investigation of unsteady airflow in subway influenced by piston effect based on dynamic mesh. *Tunneling and Underground Space Technology*, Volume 40, pp. 174-181.
11. F.-D. Yuan, and S. You (2007), CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform. *Tunneling and Underground Space Technology*, Volume 22, Issue 4, pp. 474-482.
12. Z. Li, C. Chen, L. Yan, S. Pan, and L. Zhang, (2017), “Cross-Ventilation” Effect of Piston Wind and Energy-Saving Evaluation for the Ventilation and Air Condition in Subway Station. *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning*, pp. 147-156.
13. N. Meng, L. Hu, L. Wu, L. Yang, S. Zhu, L. Chen, and W. Tang, (2014), Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station. *Tunneling and Underground Space Technology*, Volume 40, pp. 151-159.
14. C.-W. Chiu, T. Lu, H.-T. Chao, and C.-M. Shu, (2014), Performance assessment of video-based fire detection system in tunnel environment. *Tunneling and Underground Space Technology*, Volume 40, pp. 16-21.
15. O. Lanchava, N. Ilias, and G. Nozadze, (2017), Some problems for assessment of fire in road tunnels. **Supplement of Quality-Access to Success, Bucharest**, Vol. 18, Issue S1, pp. 69-72.
16. N. Ilias, O. Lanchava, and G. Nozadze, (2017), Numerical modelling of fires in road tunnels with longitudinal ventilation system. **Supplement of Quality-Access to Success, Bucharest**, Vol. 18, Issue S1, pp. 85-88.
17. O. Lanchava, G. Abashidze, and D. Tsverava, (2017), Securing fire safety for underground structures. **Supplement of Quality-Access to Success, Bucharest**, Vol. 18, Issue S1, pp. 47-50.