



**ЗРГИМ**  
Здружение на  
рударски и  
геолошки инженери  
на Р. Македонија

**XII<sup>TO</sup> СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ НА ТЕМА:**  
Технологија на подземна и површинска експлоатација на  
минерални сировини

**ПОДЕКС – ПОВЕКС '19**

Струмица  
01 – 03. 11. 2019 год.

## **МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ЕВАЛУАЦИЈА НА ВРЕМЕТО ЗА ЕВАКУАЦИЈА ВО СЛУЧАЈ НА ПОЖАР ВО РУДНИЦИТЕ ЗА ПОДЗЕМНА ЕКСПЛОАТАЦИЈА**

**Ванчо Аџиски<sup>1</sup>, Зоран Десподов<sup>1</sup>, Далибор Серафимовски<sup>2</sup>,  
Стојанче Мијалковски<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Универзитет „Гоце Делчев“, Факултет за природни и технички науки,  
Штип, Р. Северна Македонија

<sup>2</sup>Универзитет “Гоце Делчев”, Електротехнички факултет, Штип,  
Р. Северна Македонија

**Апстракт:** Несреќите кои се поврзани со пожари и изложеност на токсични гасови се едни од главните генератори на смртни случаи во рудниците за подземна експлоатација. Овој вид на вонредни ситуации бара воведување на посебни системи и пристапи за зголемување на безбедноста.

Во овој труд е презентирана методологија за евалуација на времето за евакуација, за чија цел е изработен модел и систем за предвидување на штетните ефекти од инхалација на токсичните продукти од симулирано хипотетичко пожарно сценарио. Резултатите од предложената методологија можат да послужат за евалуација на планот за евакуација, со што нуди можност за целосна анализа на временскиот период од моментот на започнување па се до крајот на евакуацијата во случај на пожар.

Главниот придонес на овој труд е лоцирано во неговото учество во развојот на модели и системи кои ќе придонесат за подобрување на плановите за евакуација во случај на пожар во рудниците за подземна експлоатација.

**Клучни зборови:** евалуација, план за евакуација, пожари, модел, систем, рудници за подземна експлоатација

## **METHODOLOGY FOR EVALUATION OF THE EVACUATION TIME IN CASE OF FIRE IN UNDERGROUND MINES**

**Vancho Adjiski<sup>1</sup>, Zoran Despodov<sup>1</sup>, Dalibor Serafimovski<sup>2</sup>,  
Stojance Mijalkovski<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>University “Goce Delcev”, Faculty of natural and technical sciences, Stip,  
R. of North Macedonia

<sup>2</sup>University “Goce Delcev”, Faculty of electrical engineering, Stip,  
R. of North Macedonia

**Abstract:** Accidents related to fires and exposure to toxic gases are one of the main causes of deaths in underground mines. This type of emergency, requires the introduction of special systems and approaches to increase safety.

*This paper presents a methodology for the evaluation of evacuation time, for which a model and system for predicting the inhalation effects of toxic products from a simulated hypothetical fire scenario has been developed. The results of the proposed methodology can be used to evaluate the evacuation plan, thus offering the opportunity to fully analyze the time period from the moment of beginning to the end of the fire evacuation.*

*The main contribution of this paper is located in its participation in the development of models and systems that will contribute to the improvement of fire evacuation plans in underground mines.*

**Key Words:** *Evaluation, evacuation plan, fires, model, system, underground mines*

## **1. ВОВЕД**

Рудниците за подземна експлоатација сами по себе претставуваат предизвикувачки средини и комбинирани заедно со пожарно сценарио можат да создадат неконтролирани процеси што ги ставаат на ризик животите на сите инволвирани [1].

Целта на овој труд е насочена кон развој на методологија која се состои од модел и систем за анализа и евалуација на времето за евакуација во случај на пожар во рудниците за подземна експлоатација.

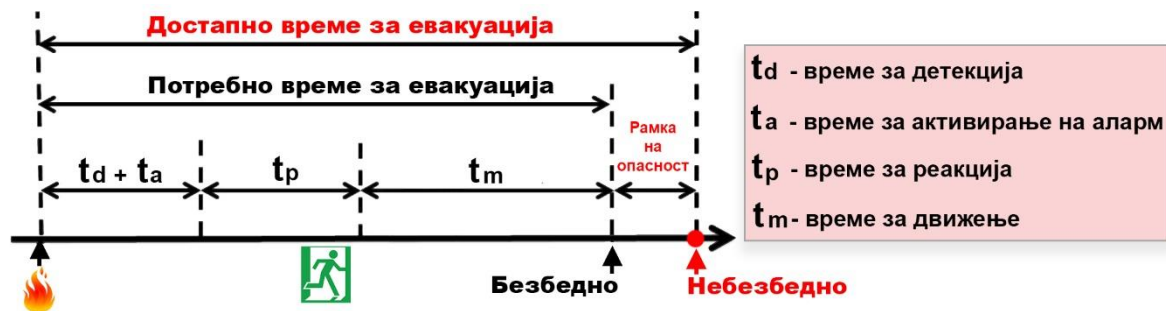
Во овој труд се презентирани резултатите добиени од моделирано пожарно сценарио во кое е пресметано и симулирано движењето на чадот и пожарните гасови низ подземните рударски простории. Врз база на податоците добиени од моделираното пожарно сценарио се направени пресметки за акумулирачкиот ефект на изложеност на човечкиот организам на јаглерод моноксид (CO), претставени во вид на фракциона доза. Основниот концепт на моделот за фракциона доза е збир на пропорционалните фракции на CO дози во зависност од времето, и кога акумулираната сума ја надминува одредената безбедносна вредност, времето за евакуација од тој момент влегува во небезбедна рамка. За подетална анализа а воедно и за потврдување на резултатите добиени од предложениот модел, изработен е систем за предвидување на карбоксиемоглобин (COHb) во крвта како резултат на инхалација на CO генериран од пожарното сценарио. Резултатите од овој систем можат да послужат за подетална анализа на временската рамка за евакуација и нејзино поврзување со валидирани клинички симптоми од формирање на карбоксиемоглобин (COHb) во крвта како резултат од пожарното сценарио.

## **2. МЕТОДОЛОГИЈА НА РАБОТА**

### **2.1 Модел за евалуација на времето за евакуација врз база на фракциона доза од CO инхалација во случај на пожар**

Во случај на пожар во рудниците за подземна експлоатација, рударите можат да бидат подложени на услови што можат да доведат до нивна повреда или смрт. Неподносливите услови за време на пожарот се дефинираат како услови на средината во кои човечкиот живот не е одржлив од изложеност на топлина и вдишување на токсични гасови.

Процесот на изработка на ефективни планови за евакуација во случај на пожар се базира на утврдувањето дали рударите можат успешно да се евакуираат врз основа на споредбата на двете временски рамки, достапното време за евакуација и потребното време за евакуација (Слика 1) [2].



Слика 1. Анализа на временската рамка за евакуација врз база на потребното и достапното време за евакуација

Основната цел при анализата на временските рамки за евакуација е да се тестираат плановите за евакуација во случај на пожар во кои за ефикасен и безбеден план за евакуација ќе се смета оној план кој влегува во рамката на потребното време за евакуација. Рамката на достапното време за евакуација го опфаќа периодот од започнувањето на пожарното сценарио до појавата на услови во кои евакуацијата сама по себе повеќе не е возможна [3].

$$\text{Потребно време за евакуација} = t_d + t_a + t_p + t_m \quad (1)$$

Каде што,  $t_d$  – време за детекција (претставува времето од започнувањето на пожарот до негова детекција);  $t_a$  – време за активирање на аларм (време од детекцијата на пожарот до алармирање на рударите да се евакуираат;  $t_p$  – време за реакција (време пред рударите да започнат да се движат кон излезот и тоа го вклучува времето за инсталирање на самоспасителите и самата реакција предизвикана од пожарното сценарио);  $t_m$  – време за движење (потребно време за рударите да се евакуираат до безбедното место).

Небезбедните делови во плановите за евакуација во случај на пожар можат да се лоцираат со пристапи кои го одредуваат акумулирачкиот ефект на изложеност на штетности генерирани од пожар, претставени во форма на фракциона доза на изложеност. Во овој труд ќе биде претставен модел за пресметка на фракциона доза на изложеност од инхалација на CO во симулирано хипотетичко пожарно сценарио.

Вредноста на фракционата доза  $\geq 1,0$  е поврзана со штетни и опасни ефекти кои ги прават сите инволвирани неспособни за евакуација. Со помош на оваа вредност на фракционата доза ќе ја одредиме и временската рамка на достапното време за евакуација. Целта на овој модел е да ги искористи вредностите на фракционата доза во мапирањето на целиот процес на евакуација со што ќе даде приказ на акумулирачкиот ефект од инхалација на CO за секој временски интервал  $\Delta t$ . Моделот се темели на математичка формулација која е дадена во следниов вид [4]:

$$FD_{\text{штетност}} = FD_{CO} * V_{CO_2} + FD_{O_2} \quad (2)$$

$$FD_{CO} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{K * [CO]^{1,036}}{D} \Delta t \quad (3)$$

$$V_{CO_2} = \frac{\exp(0,1903 * \%CO_2 + 2,0004)}{7,1} \quad (4)$$

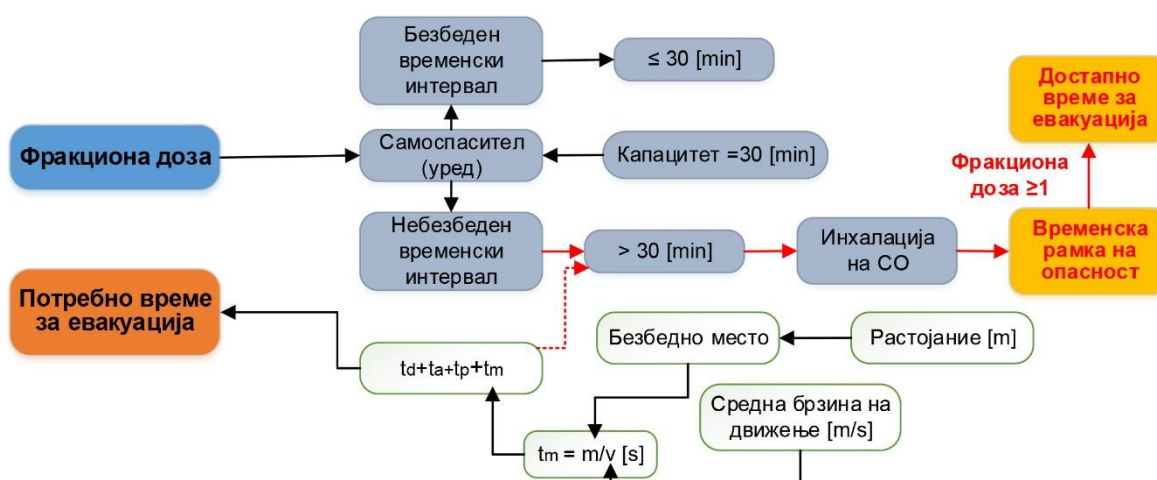
$$FD_{O_2} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\exp(8,13 - 0,54(20,9\% - \%O_2))} \Delta t \quad (5)$$

Каде што, CO е средната концентрација на јаглерод моноксид (ppm) во текот на временскиот интервал  $\Delta t$  (во минути); K и D се константи во зависност од активноста на лицето (види Табела 1, за вредности базирани на различни нивоа на активности); % CO<sub>2</sub> е концентрација на јаглерод диоксид, иако не е токсичен во концентрации до 5%, го стимулира дишењето што може да ја зголеми стапката со која се вдишуваат другите токсични елементи генерирани од пожарното сценарио; и (20,9 %-O<sub>2</sub>) е намалувањето на концентрацијата на кислород со текот на времето  $\Delta t$ , поради пожарното сценарио.

**Табела 1.** Вредности на константите K и D базирани на различни нивоа на активности

Активност	K	D
Мирување	$2,81945 \cdot 10^{-4}$	40
Слаба активност	$8,2925 \cdot 10^{-4}$	30
Зголемена активност	$1,6585 \cdot 10^{-4}$	20

Во процесот на пресметка на фракционата доза ќе го земеме во предвид капацитетот на самоспасителот, што значи дека фракционата доза во моделираното пожарно сценарио ќе ја пресметуваме откако ќе заврши дејството на самоспасителот. За потребите на оваа анализа, капацитетот на самоспасителот е земен во временски интервал од 30 минути. Во овој истражувачки труд, параметрите на потребното време за евакуација, достапното време за евакуација и фракционата доза на изложеност ќе ги премеаваме според моделот прикажан на Слика 2.



**Слика 2.** Модел за пресметка на потребното време за евакуација, достапното време за евакуација и фракционата доза на изложеност

Една од ограничувањата на овој модел е немање на јасна безбедносна рамка помеѓу вредноста на фракционата доза во која од безбедно време за евакуација влегуваме во небезбедна зона. Според предходно искажаното, потребното време за евакуација за да влезе во зоната на безбедна евакуација, вредноста на фракционата доза треба да биде <1. Овде се поставува прашањето колку помала од 1?

За да го подобриме моделот во однос на ова прашање, ќе воведеме дополнителен систем кој ќе ни овозможи да ја поврземе целата временска рамка

за евакуација со систем за предвидување на карбоксиемоглобин (COHb) во крвта како резултат на инхалација на CO генериран од пожарното сценарио. Предложениот систем за предвидувањето на COHb (%) со соодветните клинички симптоми, поврзано со моделот за фракционата доза, може точно да ја одреди границата до која евакуацијата ќе се смета за безбедна.

## 2.2 Систем за предвидување на COHb концентрација како резултат од инхлација на CO

Огромна опасност генерирана од пожарите е вдишениот CO, поради тоа што дејствува негативно на човечкото тело со тоа што се натпреварува со кислородот за хемоглобинот во крвта и го врзува како COHb отколку како нормален оксиемоглобин (O<sub>2</sub>Hb) [5]. Изложеноста на голема концентрација на CO е смртоносна, бидејќи има повеќе од 200 пати поголем врзувачки афинитет со хемоглобинот во крвта отколку онаа на кислородот.

**Табела 2.** Приближна корелација помеѓу нивото на COHb во крвта (%) и клиничките симптоми [5]

COHb (%)	Клинички симптоми
<1	Нормална вредност за непушачи
5-10 %	Потешкотии во дишењето, можно чувство на затегнатост на главата, намалување на визуелна перцепција;
11-20 %	Блага главоболка и можно чувство на затегнатост на главата проследено со вртоглавица, конфузија и намалена способност за движење;
21-30 %	Главоболка, блага мачнина, кратко губење на свеста, несвестица, лесна замореност, нарушена проценка, замагленост на видот;
31-40 %	Неподнослива главоболка, вртоглавица, респираторни потешкотии, можна кома;
>40 %	Оштетување на мозокот, голема опасност по живот, смрт доколку изложеноста продолжи.

Предложениот систем го интегрира пристапот за мониторинг и анализа, користејќи Arduino модул, сензори и мобилен телефон со специјално развиена апликација за предвидување на COHb (%) (Слика 3).

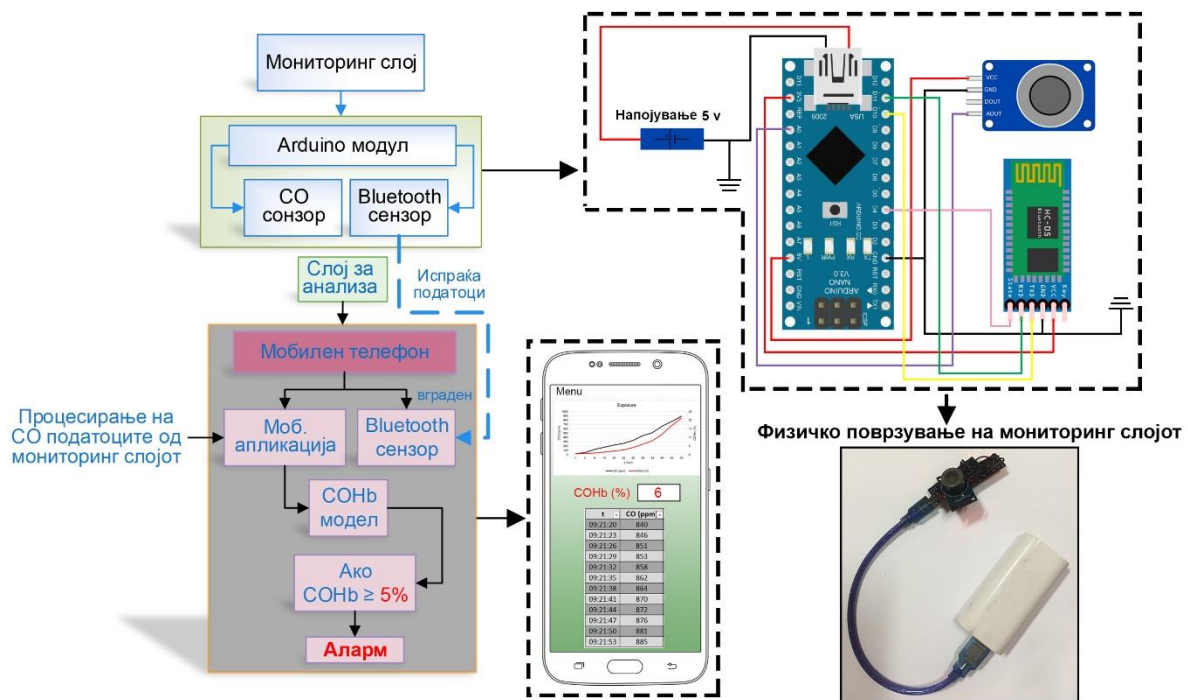
Овој систем е дизајниран да го предвиди формирањето на COHb (%) во крвта како резултат од инхалација на CO, а во исто време да алармира и да го идентификува безбедносниот временски лимит за навремена инсталација на самоспасителот.

Предложениот систем за предвидување на нивото на COHb (%) во крвта како резултат на инхалација на CO, ќе има двојна улога, и тоа:

1. Подобрување на моделот за пресметка на потребното време за евакуација, достапното време за евакуација и фракционата доза на изложеност, со што ќе даде дополнителен параметар во форма на COHb (%), со кој ќе може подетално да се одреди временската границата до која евакуацијата ќе се смета за безбедна.
2. Системот може да се искористи како индикатор за навремена инсталација на самоспасителите во случај на пожар.

Мониторинг слојот од предложениот систем се состои од Arduino Nano 3.0, сензор MQ-7 за детекција на CO, Bluetooth модул и напојување. Слојот за

анализа на податоците од предложениот систем се состои од мобилен телефон со специјално развиена апликација за предвидување на COHb (%) и го користи вградениот Bluetooth сензор од мобилниот телефон за комуникација со мониторинг слојот.



Слика 3. Системска архитектура на предложениот систем

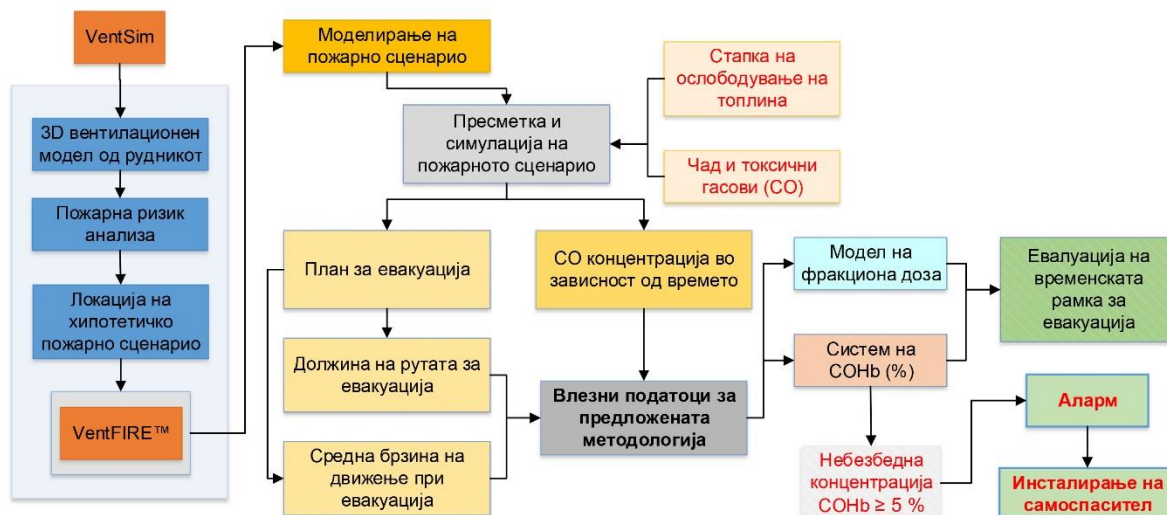
Системот е дизајниран да открие присуство на CO гас во подземната рудничка атмосфера со помош на MQ-7 CO сензорот, поврзан за Arduino модулот. Мониторинг податоците се обработуваат на секоја 1 секунда со помош на вградениот ATmega328 микроконтролер во Arduino Nano модулот.

За потребите на системот, развиен е специјален алгоритам за да ги процесира и испраќа преку Bluetooth врска, собраните податоци од MQ-7 CO сензорот до апликацијата која е инсталирана на мобилен телефон. Апликацијата се темели на Coburn, Forster, Kane (CFK) [6] модел за предвидување на COHb (%) во крвта како резултат на инхалација на CO гас и истата е развиена со Андроид програмскиот пакет. Повеќе детали за моделот и начинот за неговата изработка ќе бидат претставени во понатамошните истражувања од истиот автор.

### 3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

За подобра презентација на погоре изнесената методологија, ќе моделираме хипотетичко пожарно сценарио во рудник за подземна експлоатација, од кое ќе ја извлечеме CO концентрацијата во зависност од времето.

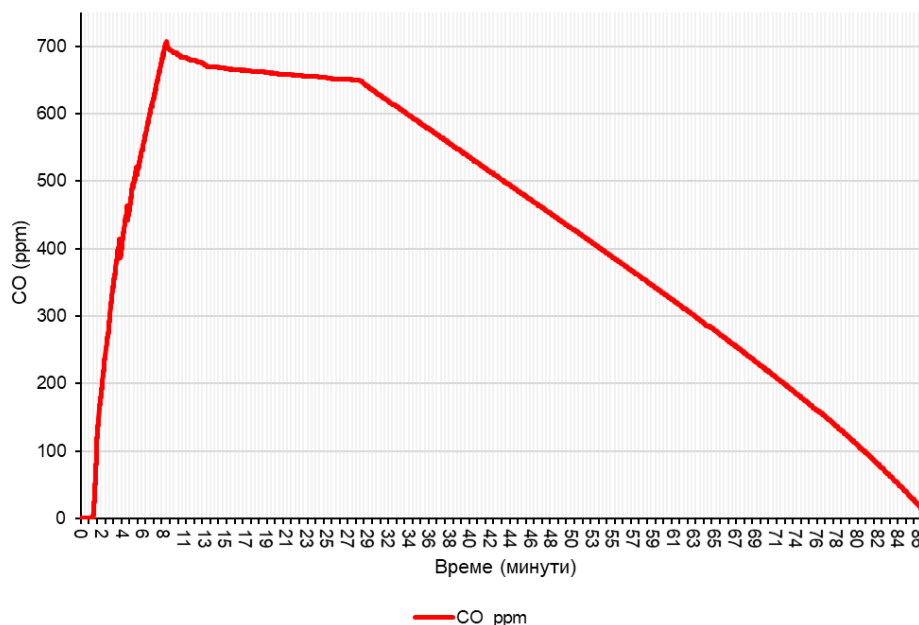
За моделирање на пожарното сценарио го користевме модулот VentFIRE кој е дел од софтверот за вентилација VentSim. Процесот на моделирање и симулирање на пожарни сценарија во рудниците за подземна експлоатација се дадени во предходни објавени истражувања од истиот автор [7,8,9].



**Слика 4.** Чекори на предложената методологија за евалуација на временската рамка при евакуација во случај на пожар во рудниците за подземна експлоатација

За потребите на моделираното хипотетичко пожарно сценарио, е претпоставен пожар генериран од пневматикот (гумата) на товарно-транспортна механизација SANDVIK LH115L. За да се поедностави моделот, ќе претпоставиме дека пожарот нема да се прошири и ќе остане локализиран само на еден од пневматиците на товарно-транспортна механизација.

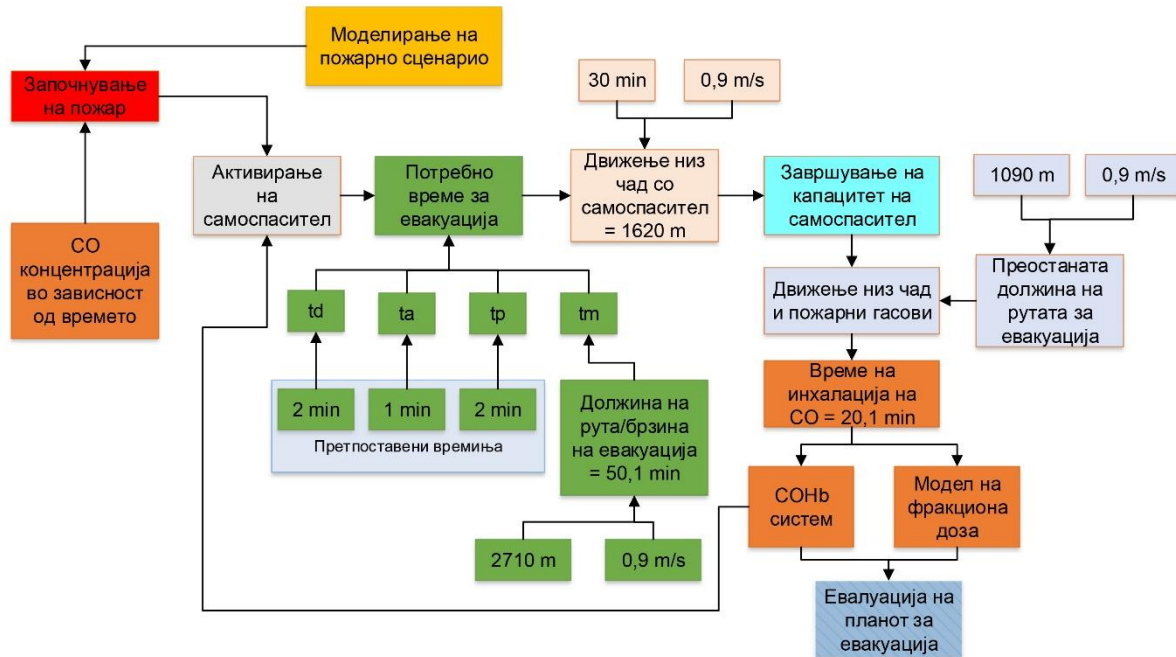
Од направената пресметка и симулација на предходно дефинираното пожарно сценарио во VentFIRE модулот, во кои се внесени физичките и хемиските карактеристики на пневматикот, ја добивме CO концентрацијата низ рутата за евакуација во зависност од времето, прикажана на Слика 5.



**Слика 5.** CO концентрација низ рутата за евакуација во зависност од времето

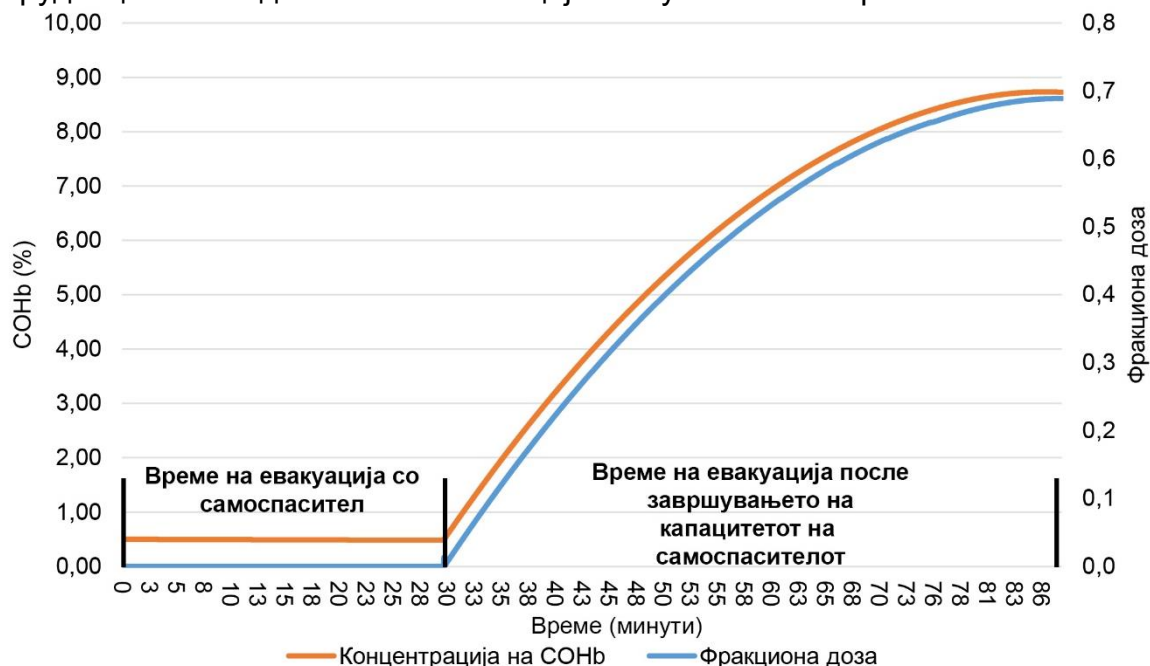
Резултатите од моделираното пожарно сценарио ги внесуваме во предходно презентираниот методологија за пресметка на фракционата доза и SO<sub>2</sub>(%) како резултат од инхалација на CO (Слика 4).

Од предложениот систем за предвидување на  $COHb$  (%) концентрација ќе ја искористиме само апликацијата инсталирана на мобилен телефон во кој ќе ја внесеме  $CO$  концентрацијата во зависност од времето за да ја добиеме предвидената  $COHb$  (%) концентрација, бидејќи работевме со резултати од симулирано пожарно сценарио.



Слика 6. Моделирано сценарио за тестирање на предложената методологија

Резултатите добиени од претставената методологија (Слика 6), ќе ни послужат за евалуација на временската рамка на рутата за евакуација во случај на пожар во рудниците за подземна експлоатација. Резултатите се прикажани на Слика 7.



Слика 7. Резултати во форма на  $COHb$  и фракциона доза за евалуација на временската рамка при процесот на евакуација



Резултатите од симулираното хипотетичко пожарно сценарио, ја демонстрираат идејата позади предложената методологија за евалуација на временската рамка при процесот на евакуација. Од резултатите прикажани на Слика 7, во првите 30 минути од процесот на евакуација, соодветната концентрација на фракционата доза и СОНb концентрацијата се на безбедно ниво поради користењето на самоспасител. По завршувањето на капацитетот на самоспасителот, концентрацијата на предходно дефинираните параметри почнува да се зголемува поради инхалација на СО. По направената анализа на добиените концентрации на фракционата доза и СОНb (%) (Слика 7), според предходно изнесеното може да се заклучи дека инволвираните би се евакуирале успешно со помали потешкотии (види, концентрација со клинички симптоми, Табела 2.). Ваквиот пристап кон анализата на плановите за евакуација значително ја зголемуваат безбедноста во случај на пожар во рудниците за подземна експлоатација.

Резултатите од оваа анализа покажуваат многу важен сегмент во процесот на изработка на плановите за евакуација во случај на пожар, бидејќи нуди можност да се докаже дали предложените постапки и планови за евакуација ги исполнуваат сите безбедносни стандарди и дефинирани цели.

#### **4. ЗАКЛУЧОК**

Во овој труд е претставена методологија, во која е развиен модел и систем за предвидување на опасностите кои се генерираат како резултат од инхалација на СО во случај на пожар и истите можат да послужат за евалуација на плановите за евакуација. Со ваквиот начин на анализа, можеме да ги лоцираме сите планови за евакуација кои не ги задоволуваат потребните безбедносни услови и исто така да се пронајдат мерки за подобрување на целиот систем за евакуација во случај на пожар во рудниците за подземна експлоатација. Исто така во процесот на подобрување на пожарната ризик анализа, предложената методологија овозможува изработка на планови за евакуација засновани врз резултатите од моделирани сценарија заедно со резултатите од предвидените штетности генерирани од инхалација на СО.

За да се претстави идејата позади предложената методологија, истата беше тестирана со помош на резултати добиени од симулирано пожарно сценарио од кое беше извлечена СО концентрацијата низ рутата за евакуација во зависност од времето. Резултатите кои се добиени во форма на фракциона доза и СОНb (%) од инхалација на СО, можат да послужат за темелна анализа на целата временска рамка на процесот за евакуација. Исто така предложената методологија може да придонесе во процесот на лоцирање на местата во кои е потребно инсталирање на дополнителни системи за подршка на евакуацијата како и тестирање на целиот процес на евакуација, што значително ја зголемува безбедноста во случај на пожар во рудниците за подземна експлоатација.

#### **КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Adjiski, V., Despodov, Z., Mirakovski, D., & Mijalkovski, S. (2015): Fire Risk Assessment and Computer Simulation of Fire Scenario in Underground Mines. *Studies in Engineering and Technology*, 2(1), pp. 54-60. <http://dx.doi.org/10.11114/set.v2i1.825>.

- [2] Purser, D.A. (2003): ASET And RSET: Addressing Some Issues In Relation To Occupant Behaviour And Tenability. *Fire Safety Science*, 7, pp.91-102. doi:10.3801/IAFSS.FSS.7-91
- [3] Li-li, H., Guo-qing, Z. H. U., Guo-wei, Z., & Fei, Y. I. N. (2013): Research the Occupants Safe Egress of Underground Pedestrian Street Based on the Analysis of Fire Smoke Movement. *Procedia Engineering*, 52, pp.158–164. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.121>
- [4] Purser, D. (2002): Toxicity assessment of combustion products. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed. NFPA, Quincy, MA.
- [5] Chaloulakou, A., Fili, N., & Spyrelis, N. (2000): Occupational exposure to CO concentrations in enclosed garages: Estimation of blood COHb levels. *Environmental Pollution, Proceedings of the 5th International Conference, 2000, Thessaloniki, Greece*, pp.934-940.
- [6] Coburn, R.F., Forster, R.E., & Kane. P.B. (1965): Considerations of the physiological variables that determine the blood carboxyhæmoglobin concentrations in man. *The Journal of clinical investigation*, 44, pp.1899-1910. doi: 10.1172/JCI105296.
- [7] Adjiski, V., Mirakovski, D., Despodov, Z., & Mijalkovski, S. (2015): Simulation and optimization of evacuation routes in case of fire in underground mines. *Journal of Sustainable Mining*, 14(3), pp.133–143. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2015.10.001>
- [8] Adjiski, V., Mirakovski, D., Despodov, Z., & Mijalkovski, S. (2016): CFD simulation of the brattice barrier method for approaching underground mine fires. *Mining Science*, 23, pp.161–172. doi: 10.5277/ msc162313.
- [9] Adjiski, V., Mirakovski, D., Despodov, Z., & Mijalkovski, S. (2015): Modeling of fire scenarios in underground mines. *Natural Resources and Technologies*, 9 (9). pp. 29-47. ISSN 185-6966