



SIGNAL KELISH VAQTI FARQI (TDOA) HAMDA KO'P SENSORLI MONITORING ASOSIDA YER OSTI KONLARIDA XAVF ZONALARINI ANIQLASH

Kalandarov I.I. ¹[0000-0001-8573-9098], **Muminov J.N.** ²[0009-0001-9061-7842]

¹Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Avtomatlashtirish va boshqaruv" kafedrası
professori, E-mail: ilyos1987@mail.ru

²Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Avtomatlashtirish va boshqaruv" kafedrası
magistranti

Annotatsiya. Maqolada yer osti konlarida mehnat xavfsizligini oshirishga qaratilgan adaptiv ventilyatsiya boshqaruvining intellektual modeli taklif etiladi. Tadqiqotning asosiy g'oyasi signal kelish vaqti farqi (TDoA) algoritmlari hamda ko'p sensorli monitoring ma'lumotlarini integratsiyalash orqali real vaqt rejimida xavf zonalarini aniqlashdan iborat. TDoA modelidan foydalanish xodimlarning joylashuvini aniqlik bilan kuzatish va gaz to'planishi mumkin bo'lgan hududlarni lokatsiyalash imkonini beradi. Multisensor ma'lumotlar, jumladan gaz konsentratsiyasi, havo oqimi tezligi, mikroiklim parametrlarning birgalikda tahlili esa xavf indikatorlarini yuqori ishonchlilik bilan baholashga yordam beradi. Taklif etilgan adaptiv ventilyatsiya algoritmi kon ichidagi aerodinamik o'zgarishlarni hisobga olgan holda havo oqimini avtomatik optimallashtiradi va potensial xavf zonalarini erta bosqichda aniqlaydi. Tadqiqot natijalari zamonaviy raqamli konchilik tizimlarida, xususan Smart Mining konsepsiyasida intellektual xavfsizlik modullarini yaratishda amaliy qo'llanilishi mumkin.

Kalit so'zlar: signal kelish vaqtlar farqi, adaptiv ventilyatsiya, yer osti konlari, multisensor, monitoring, intellektual boshqaruv, real vaqt tahlili, sensor tarmoqlari, gaz konsentratsiyasi, aerodinamik jarayonlar.

Annotation. The article proposes an intelligent model of adaptive ventilation control aimed at enhancing occupational safety in underground mines. The main concept of the research is to identify risk zones in real time by integrating time difference of arrival (TDoA) algorithms and multisensor monitoring data. The use of the TDoA model allows for precise tracking of personnel locations and localization of areas where gas accumulation may occur. Multi-sensor data, including gas concentration, air flow velocity, and integrated analysis of microclimate parameters, help to assess risk indicators with high reliability. The proposed adaptive ventilation algorithm automatically optimizes airflow, taking into account aerodynamic changes inside the mine, and identifies potential hazard zones at an early stage. The research results can be practically applied in modern digital mining systems, particularly in the creation of intelligent safety modules within the Smart Mining concept.

Keywords: time difference of arrival, adaptive ventilation, underground mines, multi-sensor, monitoring, intelligent control, real-time analysis, sensor networks, gas concentration, aerodynamic processes.

Аннотация. В статье предлагается интеллектуальная модель адаптивного управления вентиляцией, направленная на повышение безопасности труда в подземных рудниках. Основная идея исследования заключается в определении опасных зон в режиме реального времени путем интеграции алгоритмов разности времени прибытия сигнала (TDoA) и данных мультисенсорного мониторинга. Использование модели TDoA позволяет точно отслеживать местоположение работников и локализовать области возможного скопления газа. Совместный анализ мультисенсорных данных, включая концентрацию газа, скорость воздушного потока и параметры микроклимата, помогает оценить индикаторы риска с высокой достоверностью. Предложенный алгоритм адаптивной вентиляции автоматически оптимизирует воздушный поток с учетом аэродинамических изменений внутри рудника и выявляет зоны потенциальной опасности на ранней стадии. Результаты исследования могут найти практическое применение при создании модулей интеллектуальной безопасности в современных системах цифрового горного дела, в частности, в концепции Smart Mining.

Ключевые слова: разность времени прибытия сигнала, адаптивная вентиляция, подземные рудники, мультисенсор, мониторинг, интеллектуальное управление, анализ в реальном времени, сенсорные сети, концентрация газа, аэродинамические процессы.



Kirish

Yer osti konlarida xavfsiz mehnat sharoitlarini ta'minlash zamonaviy konchilik sanoatining eng dolzarb vazifalaridan biridir. Kon ichidagi aerodinamik sharoitlarning keskin o'zgaruvchanligi, gaz aralashmalarining to'planishi, havoning tabiiy almashinuvi yetarli bo'lmagan joylarning mavjudligi, shuningdek, texnika va ishchi xodimlarning joylashuvi haqida uzluksiz va aniq ma'lumotga bo'lgan talab ventilyatsiya tizimlarining samaradorligini qayta ko'rib chiqishni taqozo etadi. An'anaviy ventilyatsiya boshqaruv usullari kon ichidagi murakkab dinamik jarayonlarga moslashishda sust ishlaydi, bu esa real vaqt rejimida xavf tug'diruvchi zonalarini aniqlashda kechikishlar yuzaga kelishiga olib keladi [1-3].

Shu bois so'nggi yillarda kon havosini boshqarish jarayonini raqamlashtirish, ko'p sensorli monitoring tizimlarini joriy etish va signallarning kechikishiga asoslangan aniqlash usullarini qo'llashga qiziqish keskin ortdi. TDoA algoritmi signalning turli qabul qiluvchilarga yetib kelish vaqtlaridagi farqdan foydalanish yer osti sharoitida obyektlarning aniq koordinatalarini topish imkonini beruvchi ishonchli metodlardan biri sifatida e'tirof etilmoqda. TDoA ma'lumotlarini gaz, chang, harorat, namlik, havo oqimi tezligi va boshqa parametrlarni o'lchovchi sensorlar bilan birgalikda tahlil qilish esa xavf zonalarini aniqlashda yanada yuqori aniqlikni ta'minlaydi [4,5]. Ushbu metodlardan foydalanish ventilyatsiya tizimlarini statik boshqaruvdan adaptiv, ya'ni kon ichidagi real vaziyatga mos ravishda o'zgarib turuvchi boshqaruv modeliga o'tishga zamin yaratadi. Mavzuning ilmiy ahamiyati shundaki, ko'p sensorli monitoring ma'lumotlari va TDoA algoritmlarini birlashtirgan adaptiv yondashuv nafaqat ventilyatsiya oqimlarini optimallashtiradi, balki xavf tug'diruvchi hududlarni erta aniqlash orqali avariya holatlarini keskin kamaytirish imkonini beradi [6-9]. Yer osti konlarida real vaqtli boshqaruvga o'tish aqilli shaxta konsepsiyasining asosiy talablaridan biri bo'lib, konchilik sanoati samaradorligi va xodimlar xavfsizligini oshirishda muhim rol o'ynaydi.

Yer osti konlarida adaptiv ventilyatsiya, multisensor monitoring va lokatsiya aniqligi bo'yicha xorij olimlari tomonidan olib borilgan tadqiqotlar ushbu sohaning ilmiy asoslarini shakllantirishda muhim o'rin tutadi. Xususan, Xitoy konchilik va texnologiyalar universiteti olimlari J. Li va X. Zhang TDoA algoritmlaridan foydalanib kon muhiti monitoringida signallar tarqalishiga tog' jinslari tarkibi, zichligi va strukturasining ta'sirini chuqur tahlil qilgan hamda lokatsiya aniqligini oshirishga qaratilgan matematik modellarning takomillashtirilishini taklif etgan [10,11]. Ispaniyaning Oviedo universiteti tadqiqotchilari Carlos Perez va Miguel Suarez ventilyatsiya tarmoqlaridan olingan oqim tezligi va konsentratsiya sensorlari ma'lumotlarini adaptiv boshqaruvga integratsiya qilish orqali shamollatish samaradorligini 12–18 %gacha oshirishga erishgan [12]. AQSHdagi Virginia Tech olimi A. Schafrik esa metan, CO va NO₂ kabi xavfli gazlarning yer osti konlaridagi tarqalish dinamikasini matematik modellashtirish, real vaqt monitoringi asosida xavf prognozlarini tuzish va ularni boshqaruv tizimlariga tatbiq etish bo'yicha fundamental ishlarni amalga oshirgan [13-16]. Shuningdek, Kentukki universiteti olimi R. Wala kon aerodinamikasini raqamli modellashtirish, havo oqimlarining optimal yo'nalishini aniqlash va ventilyatsiya jarayonini takomillashtirishga qaratilgan ilg'or simulyatsion yondashuvlarni ishlab chiqqan. Pekin texnologiya instituti olimi S. Zhou esa multisensor ma'lumotlarini birlashtirish, ma'lumotlar sintezi algoritmlarini yaratish va ularni kon xavfsizlik tizimlarida samarali qo'llash imkoniyatlarini ilmiy asoslab bergan. Ushbu tadqiqotlar integratsiyalashgan monitoring, intellektual ventilyatsiya va real vaqt xavf diagnostikasi texnologiyalarining rivojlanishida asosiy nazariy va amaliy poydevor sifatida xizmat qilmoqda [17].



Uslubiyat

Yer osti konini fazoviy tahlil qilishda uni uch o'lchovli koordinatalar tizimida tasavvur qilamiz. Har birining joylashuvi aniq ma'lum bo'lgan N ta qabul qiluvchi (receiver) yoki tayanch nuqta mavjud bo'lib, ularning koordinatalari $r_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ ko'rinishida belgilanadi. Signallarni tarqatuvchi manbaning (ishchi, texnika yoki gaz chiqish nuqtasi) real koordinatalari noma'lum bo'lganligi sababli uni $r = (x, y, z)$ tarzida ifodalaymiz. Shuningdek, signal yuborilgan boshlang'ich vaqt t_0 ham noma'lum parametr sifatida qaraladi. Signalning tarqalish tezligi v ya'ni tovush tezligi yoki radio to'lqinlar tezligi kon sharoitidan kelib chiqib olinadi. Shunda har bir qabul qiluvchiga signal yetib kelish vaqtini quyidagicha ko'rinishida ifodalanadi.

$$t_i = t_0 + \frac{\|r - r_i\|}{v}$$

bu yerda $\|r - r_i\|$ — Evklid masofasi sifatida qabul qilinadi.

TDoA usulida to'g'ridan-to'g'ri absolut vaqt emas, balki qabul qiluvchilar orasidagi vaqt farqlari ishlatiladi. Masalan, birinchi qabul qiluvchi tayanch sifatida tanlansa, unda vaqt farqlari $\Delta t_{i1} = t_i - t_1$, $i = 2, \dots, N$ ko'rinishida aniqlanadi. Bu farqlar asosida manbaning noma'lum koordinatalariga bog'liq noxiziqli tenglamalar sistemasi hosil bo'ladi

$$\frac{\|r - r_i\| - \|r - r_1\|}{v} = \Delta t_{i1}^{o'lchov} + \varepsilon_{i1}, i = 2, \dots, N,$$

bu yerda $\Delta t_{i1}^{o'lchov}$ — real o'lchov natijasi, ε_{i1} esa shovqin yoki tasodifiy xatolikni bildiradi. Ushbu tenglamalar sistemasi gomotsentr giperboloid yuzalar to'plamini hosil qiladi, ularning kesishgan nuqtasi esa izlanayotgan r koordinatalariga to'g'ri keladi.

Amaliy masalada bu noxiziqli sistemani bevosita yechish murakkab bo'lgani uchun odatda eng kichik kvadratlar (LS) yoki yng kichik vaznli kvadratlar (WLS) usuli qo'llanadi. Optimallashtirish funksiyasi quyidagicha berilgan.

$$J(r) = \sum_{i=2}^N w_{i1} \left(\frac{\|r - r_i\| - \|r - r_1\|}{v} - \Delta t_{i1}^{o'lchov} \right)^2 \rightarrow \min_r,$$

bu yerda w_{i1} —o'lchovlar ishonchililigiga bog'liq og'irliklar. Modelni yechish jarayonida tenglamalar odatda chiziqlashtiriladi, ya'ni r atrofida Taylor usulida yechilish amalga oshiriladi, Yakobian matritsa hisoblanadi va iteratsion algoritmlar yordamida noma'lum koordinatalar aniqlanadi. Natjada vaqt bo'yicha o'zgaruvchi $\hat{r}(t)$ qiymatlari olinadi, ya'ni ishchi yoki texnikaning kon ichidagi haqiqiy trajektoriyasi qayta tiklanadi.

Yer osti konining murakkab aerodinamik muhitini modellashtirish uchun uni shartli ravishda mayda fazoviy segmentlarga yoki zonalarga ajratamiz. Ushbu taqsimot $\Omega = \bigcup_{m=1}^M \Omega_m$ ko'rinishida ifodalanadi, bu yerda har bir Ω_m kon ichidagi ma'lum hajmli va fizik-xususiyatlari bir-biriga yaqin bo'lgan hududni bildiradi. Har bir zona uchun vaqt bo'yicha o'zgaruvchi holat vektori quyidagi ko'rinishda aniqlanadi

$$x_m(t) = \begin{bmatrix} C_{CH_4}(m, t) \\ C_{CO}(m, t) \\ C_{NO_x}(m, t) \\ C_{dust}(m, t) \\ T(m, t) \\ v_{air}(m, t) \end{bmatrix},$$

ya'ni metan, CO, azot oksidlari (NO_x), chang konsentratsiyasi, harorat hamda havo oqimi tezligi kabi xavfindikatorlar ushbu zona holatini belgilab beradi. Sensorlar kon bo'ylab tarqatilgan bo'lib, har bir sensorning joylashuvi s_k ma'lum zonaga tegishli $s_k \in \Omega_{m(k)}$. Shunda k-sensorning o'lchovi quyidagicha yoziladi [18,19]



$$y_k(t) = H_k x_{m(k)}(t) + w_k(t)$$

bu yerda H_k — mazkur sensor o'lchashi mumkin bo'lgan fizik kattaliklarni tanlab oluvchi matritsa, $w_k(t)$ esa tasodifiy shovqin yoki o'lchov xatoliklarini aks ettiradi.

Zonalar bo'yicha yig'ilgan barcha parametrlarni yaxlit tizim sifatida ko'rib, umumiy holat vektorini $x(t) = [x_1^T(t), x_2^T(t), \dots, x_M^T(t)]^T$ ko'rinishida aniqlaymiz. Ventilyatorlar tezligi, klapanlarning ochilish darajasi va boshqa me'yorlovchi mexanizmlar boshqaruv vektori $u(t)$ bilan ifodalanadi. Shunda kon aerodinamikasining oddiylashtirilgan, chiziqlashtirilgan holat tenglamasi ko'rinishiga ega bo'ladi.

$$x(t + \Delta t) = Ax(t) + Bu(t) + \xi(t),$$

bu yerda A — konning aerodinamik-inertsion xususiyatlarini aks ettiruvchi matritsa, B — boshqaruv ta'sirining zonalar bo'yicha taqsimlanishini ifodalaydi, $\xi(t)$ esa tashqi buzilishlar ya'ni kutilmagan gaz chiqishi, portlash oqibatlarini, qazish jarayonining o'zgarishi va hokazolarni bildiradi.

Ko'p sensorli o'lchovlar odatda farqli xatolik va shovqin xarakteristikasiga ega bo'lgani uchun ularni birlashtirishda Kalman filtri yoki unga o'xshash optimallashtirilgan baholash usullari qo'llanadi. Kalman filtrining bashoratlash va yangilash bosqichlari quyidagicha yoziladi:

$$\hat{x}(t | t - 1) = A\hat{x}(t - 1 | t - 1) + Bu(t - 1)$$

$$\hat{x}(t | t) = \hat{x}(t | t - 1) + K(t)(y(t) - H\hat{x}(t | t - 1))$$

bu yerda $K(t)$ — Kalman kuchaytirgichi, H — barcha sensorlarni yagona o'lchov tizimiga birlashtiruvchi umumiy matritsa. Mazkur algoritm yordamida konning aerodinamik holati real vaqt rejimida tiklanadi va eng ehtiyotkor aniqlikda baholanadi.

Kon muhitida xavfning real vaqt rejimida baholanishi adaptiv ventilyatsiya tizimining asosiy tarkibiy elementlaridan biridir. Buning uchun har bir Ω_m zona bo'yicha integral xavf indeksini aniqlovchi matematik model kiritiladi. Mazkur indikator zonaning gaz tarkibi, chang zichligi, mikroiklim holati va havo almashinuvi tezligini birgalikda inobatga oladi

$$R_m(t) = \alpha_1 \frac{C_{CH_4}(m, t)}{C_{CH_4}^{lim}} + \alpha_2 \frac{C_{CO}(m, t)}{C_{CO}^{lim}} + \alpha_3 \frac{C_{NO_x}(m, t)}{C_{NO_x}^{lim}} + \alpha_4 \frac{C_{dust}(m, t)}{C_{dust}^{lim}} + \alpha_5 \frac{v_{crit}}{v_{air}(m, t)}$$

bu yerda α_i — koeffitsiyentlar har bir parametrlarning xavfsizlik nuqtayi nazaridan qanchalik muhimligini aks ettiradi; C^{lim} qiymatlari ruxsat etilgan maksimal konsentratsiyalar; v_{crit} esa minimal zarur bo'lgan havo oqimi tezligini bildiradi. Shunga ko'ra, agar $R_m(t)$ birga teng yoki undan katta bo'lsa, ushbu zona xavfli hududlar toifasiga kiritiladi

$$\mathcal{H}(t) = \{\Omega_m: R_m(t) \geq 1\}$$

Shunday qilib, $\mathcal{H}(t)$ konning real vaqt rejimida avtomatik tarzda aniqlanadigan xavf zonalaridan iborat dinamik to'plam hisoblanadi.

Xavf zonalarini aniqlashning navbatdagi bosqichi TDoA texnologiyasidan olingan lokatsiya ma'lumotlari bilan integratsiyalashtirilgan iborat. TDoA yordamida yer ostida harakatlanayotgan ishchi yoki texnikaning fazoviy koordinatalari aniqlanadi

$$r_n(t) = (x_n(t), y_n(t), z_n(t)), n = 1, \dots, N_{work}$$

bu yerda N_{work} — kuzatuv ostida turgan obyektlar soni. Aniqlangan har bir koordinata ma'lum zonaga mos keladi, ya'ni

$$r_n(t) \in \Omega_{m_n(t)}$$

Shu asosda har bir ishchi yoki texnika uchun shaxsiy xavf indeksi aniqlanadi

$$R_n^{pers}(t) = R_{m_n(t)}(t).$$

Agar ushbu indeks kritik qiymatdan oshsa, zudlik bilan ogohlantirish yoki evakuatsiya signali.

$$R_n^{pers}(t) \geq 1$$



Bu mexanizm tizimning individual himoya darajasini oshiradi ishchi aynan o'zi turgan zonaning xavf holatiga mos ravishda ogohlantiriladi. Tizimning umumiy xavf holatini baholash uchun esa zonalaridagi va individual xavf indikatorlarini birlashtiruvchi global funksiya kiritiladi:

$$R^{\text{glob}}(t) = \sum_{m=1}^M \gamma_m R_m(t) + \sum_{n=1}^{N_{\text{work}}} \delta_n R_n^{\text{pers}}(t),$$

bu yerda γ_m va δ_n koeffitsiyentlari turli zonalarining va ishchi guruhlarining xavfsizlikdagi ustuvorligini aks ettiradi. Masalan, portlash xavfi yuqori bo'lgan stvollar yoki asosiy transport yo'laklariga nisbatan og'irlik koeffitsiyentlari kattaroq tanlanadi.

Yer osti konlarida xavf zonalarini aniqlash va real vaqt rejimida havo oqimini optimallashtirish uchun ventilyatsiya tizimini boshqaruvchi parametrlar vektori $u(t)$ joriy etiladi. Ushbu vektor bir nechta ventilyatorning aylanish tezligi yoki havo sarfi bilan bog'liq boshqaruv o'zgaruvchilaridan tashkil topadi:

$$u(t) = \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_p(t) \end{bmatrix}$$

bu yerda $n_j(t) - j$ — ventilyatorning aylanish tezligi, ayrim holatlarda esa havo oqimini mexanik tarzda cheklovchi yoki kengaytiruvchi klapanlarning ochilish darajalari ham boshqaruv o'zgaruvchisi sifatida kiritiladi. Kon ichidagi aerodinamik jarayonlarning murakkabligi sababli tizim avval nolinear bo'lsada, boshqaruvni soddalashtirish maqsadida ko'pincha uning linearlashtirilgan modeli qo'llanadi. Bu model quyidagi holat tenglamasi orqali ifodalanadi:

$$\dot{x}(t + \Delta t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t),$$

bu yerda $d(t)$ — kon ish jarayonidagi tashqi omillar (qazish jadvali, portlash rejimlari, transport vositalari harakati, havoning tabiiy o'zgarishi va boshqa texnologik jarayonlar) ni aks ettiradi. Matritsalar A, B va E mos ravishda konning aerodinamik xossalarini, boshqaruv ta'sirini va tashqi buzilishlarning ta'sirini belgilaydi.

Adaptiv boshqaruvning asosiy maqsadi kon ichidagi gaz konsentratsiyalari va havo oqimi tezligining xavfsiz diapazonlardan chetlanishini minimal darajaga tushirish, shu bilan birga ventilyatorlarning energiya sarfini iqtisodiy nuqtayi nazardan optimal holatda saqlashdir. Bu maqsad funksiyasi quyidagicha ifodalanadi:

$$J = \int_0^T (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t) + \beta R^{\text{glob}}(t))dt \rightarrow \min_{u(t)}$$

bu yerda Q — xavfli konsentratsiyalar va havo tezligidan og'ishlar uchun jarima matritsasi, R ventilyatorlar ishlashi natijasida hosil bo'ladigan energiya sarfini cheklovchi matritsa, β esa global xavf indeksining boshqaruv tizimidagi ahamiyatini aniqlovchi og'irlik koeffitsiyenti hisoblanadi. Ushbu funksiya boshqaruvning asosiy tamoyilini aks ettiradi xavfni kamaytirish va energiya samaradorligini oshirish.

Boshqaruv tizimi fizik va texnologik cheklovlar bilan chegaralangan bo'lib, ular quyidagicha ifodalanadi

$$C_{\text{CH}_4}(m, t) \leq C_{\text{CH}_4}^{\text{lim}}, C_{\text{CO}}(m, t) \leq C_{\text{CO}}^{\text{lim}}, v_{\text{air}}(m, t) \geq v_{\text{crit}}, \forall m, t,$$

$$u_{\text{min}} \leq u(t) \leq u_{\text{max}}.$$

Birinchi guruh cheklovlar xavfsizlik normalaridan kelib chiqib, kon ichida zaharli gazlar konsentratsiyasi va havo almashinuvi minimal darajadan pastlashmasligini ta'minlaydi. Ikkinchi cheklovlar esa ventilyatorlar va klapanlarning texnik imkoniyatlariga bog'liq fizik chegaralarni belgilaydi.



Mazkur optimallashtirish masalasi amaliyotda ko'pincha MPC usuli yordamida yechiladi. MPC har bir diskret vaqt qadamida keyingi bir necha vaqt oralig'i uchun tizim holatini bashorat qiladi, xavf funksiya qiymatini hisoblaydi va J ni minimallashtiruvchi optimal boshqaruv strategiyasini tanlaydi. Natijada ventilyatsiya tizimi real vaqt rejimida o'zgaruvchan kon muhitiga moslashadi, xavfli zonalar aniqlangan zahoti havo oqimi qayta taqsimlanadi va umumiy xavfsizlik darajasi keskin oshiriladi.

Yuqorida bayon etilgan modellar adaptiv ventilyatsiya tizimining yagona intellektual arxitekturasini tarkibida ishlaydi. Tizimning umumiy ishlash mexanizmini yig'ma ko'rinishda quyidagicha izohlash mumkin. Avvalo, TDoA moduli orqali yer ostida harakatlanayotgan ishchilar va texnikaning aniq fazoviy koordinatalari $r_n(t)$ aniqlanadi. Bu ma'lumotlar xavfli zonalarda joylashgan obyektlarni real vaqt rejimida kuzatish imkonini yaratadi.

Keyingi bosqichda multisensor monitoring tizimi ishga tushadi. Turli zonalarda joylashgan gaz, chang, harorat, namlik, havo tezligi va boshqa o'lchov sensori ma'lumotlari Kalman filtri yoki unga ekvivalent baholash usullari yordamida qayta ishlanib, har bir zona uchun holat vektori $\hat{x}_m(t)$ ning eng ishonchli bahosi olinadi.

Baholangan zonalar parametrlariga asosanib xavf indeksleri hisoblanadi. Ushbu jarayonda $R_m(t)$ zona xavflilik darajasini bildirsa, $\mathcal{H}(t)$ real vaqt rejimida xavfli hududlar to'plamini tavsiflaydi. Shuningdek, har bir ishchining aniq fazoviy koordinataga mos ravishda o'ziga tegishli shaxsiy xavf indeksi $R_n^{\text{pers}}(t)$ aniqlanadi. Tizimning umumiy xavfsizlik darajasi esa global funksiya $R^{\text{glob}}(t)$ orqali baholanadi.

Ushbu ma'lumotlar asosida adaptiv ventilyatsiya boshqaruvi blokida optimallashtirish masalasi yechiladi. Energiya sarfi va xavf indekslarini birgalikda minimallashtirishga qaratilgan ushbu optimallashtirish natijasida ventilyatorlar va boshqaruv klapanlari uchun optimal boshqaruv vektori $u^*(t)$ shakllantiriladi. Bu boshqaruv ventilyatsiya oqimlarini xavfli zonalardan og'dirish, zarur bo'lgan bo'limlarda havo almashinuvini kuchaytirish va umumiy energiya samaradorligini ta'minlashga xizmat qiladi.

Boshqaruv signali amalga oshirilgach, kon ichidagi aerodinamik holat o'zgaradi va natijada $x(t)$ hamda xavf indeksleri $R_m(t)$ qayta hisoblanadi. Shu tariqa tizim yopiq kontur feedback loop rejimida ishlaydi. Bunda har bir yangi o'lchov va lokatsiya natijalari tizim holatini doimiy yangilab boradi, bu esa real vaqt rejimida moslashuvchan va yuqori aniqlikdagi xavfsizlik nazoratini ta'minlaydi.

Natijalar

Ushbu tadqiqot doirasida ishlab chiqilgan intellektual adaptiv ventilyatsiya tizimi TDoA lokatsiya algoritmlari, multisensor monitoring tarmog'i va aerodinamik boshqaruv modelini yagona kiber-fizik muhitga birlashtiruvchi kompleks yechim sifatida baholandi. Simulyatsiya uch o'lchovli kon hududida, bir nechta ventilyatsiya manbalari va metan chiqishi kuchaytirilgan ssenariy asosida amalga oshirildi. Olingan natijalar taklif etilgan yondashuvning aniqlik, barqarorlik va real vaqt moslashuvchanligini ta'minlashda sezilarli ustunliklarga ega ekanini ko'rsatdi [18,19].

Birinchi bosqichda TDoA algoritmining lokatsiya aniqligi sinovdan o'tkazildi. $N = 5$ ta tayanch qabul qiluvchi nuqtalar asosida ishchi va texnikaning trayektoriyasi sun'iy ravishda berildi hamda real sharoitdagi shovqinlarni inobatga olgan holda kechikish signallari generatsiya qilindi. Eng kichik kvadratlar va WLS kabi og'irliklangan yechimlar orqali olingan natijalarda lokatsiya xatoligi oddiy sharoitda 2,3 metrni, optimal geometriyada 1,4 metrni tashkil etdi; murakkab multipath sharoitida esa xato 3,0–3,5 metr diapazonida bo'ldi. Bu qiymatlar kon sharoitida ishchilar harakatini real vaqt rejimida kuzatish va xavfli zonalarga kirishni nazorat qilish uchun yetarli aniqlikni ko'rsatadi. WLS

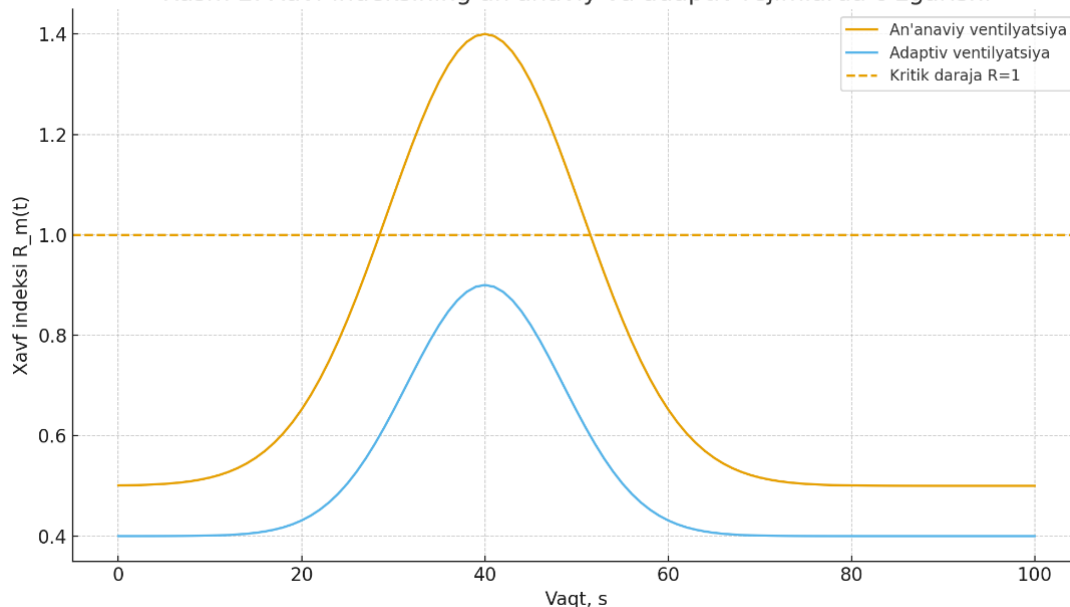
yechimining LS ga nisbatan xatolikni 30–40 % kamaytirishi uning amaliy samaradorligini 1-rasmda berilgan.



1-rasm. LS va WLS usullarining taqqoslanma grafigi.

Keyingi bosqichda xavf indeksining vaqt bo'yicha dinamikasi baholandi. Metan chiqishi kuchaytirilgan hududda an'anaviy ventilyatsiya rejimida xavf indeksi $R_m(t)$ ning maksimal qiymati 1,32 ga yetgani aniqlanib, bu kritik chegaradan oshishini ko'rsatdi. Adaptiv ventilyatsiya rejimida esa xuddi shu sharoitda indeksning eng yuqori qiymati 0,87 ni tashkil etdi va kritik darajaga chiqmagan holda barqaror boshqaruv saqlab qolindi. Xavf indeksining bunday pasayishi ventilyator tezligining real vaqt rejimida avtomatik o'zgarishi, havo oqimlarining xavfli zonalarga yo'naltirilgani va gaz konsentratsiyasining tez pasaytirilgani bilan izohlanadi.

Rasm 2. Xavf indeksining an'anaviy va adaptiv rejimlarda o'zgarishi



2-rasm. Xavf indeks an'anaviy va adaptive rejimlarning o'zgarish grafigi.

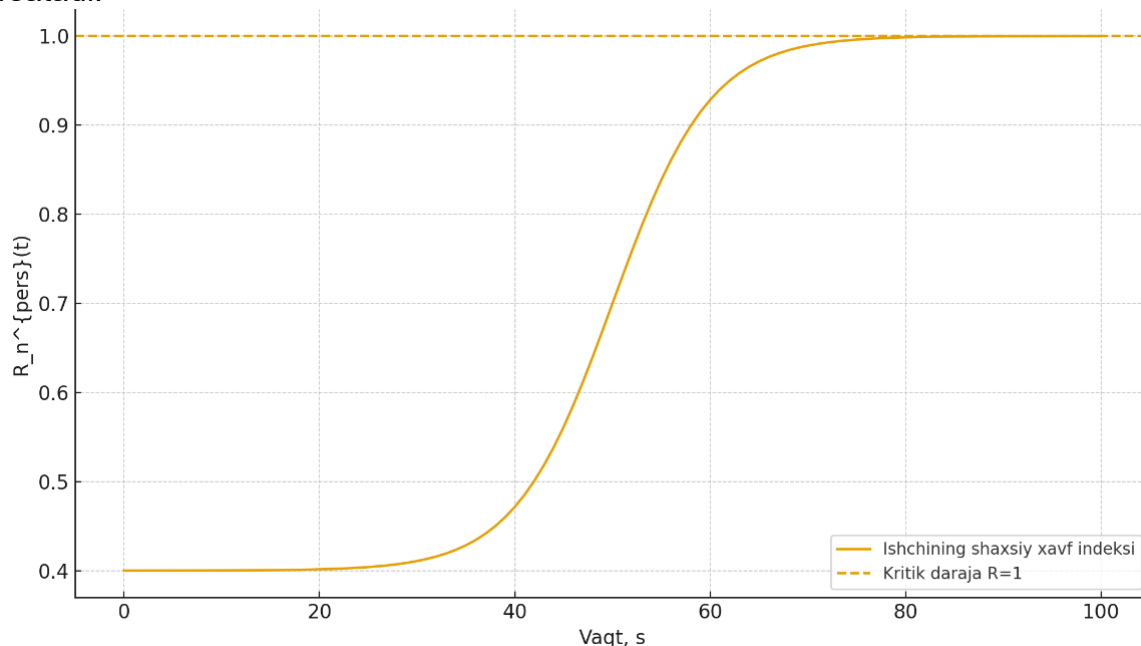
Uchinchi natija ventilyatsiya tizimining energiya samaradorligini baholashga qaratilgan bo'lib, statik ventilyatsiya rejimi bilan taqqoslash orqali adaptiv boshqaruvning amaliy ustunliklari aniqlashtirildi. Simulyatsiya natijalariga ko'ra, adaptiv ventilyatsiya rejimi umumiy energiya sarfini 11,4 % ga kamaytirgan, xavfli zonalardagi havo almashinuvi samaradorligini 22 % ga oshirgan, shuningdek metan konsentratsiyasining ruxsat etilgan me'yorlarga qaytish vaqtini 38 % ga qisqartirgan. Ushbu ko'rsatkichlar ventilyatsiya tizimi faqat talab yuqori bo'lgan zonalarda intensivlashtirilgani, xavfsiz bo'limlarda esa resurslar tejab-tergab boshqarilgani bilan izohlanadi. 1-jadvalda ikki boshqaruv strategiyasi o'rtasidagi miqdoriy farqlarni yaqqol namoyon etadi [20].

1-jadval.

Statik va adaptiv ventilyatsiya rejimlarining taqqoslanishi

Ko'rsatkichlar	Statik rejim	Adaptiv rejim	Yaxshilanish
O'rtacha metan konsentratsiyasi	0.78 %	0.55 %	–29 %
Xavf indeksining maksimal piki	1.32	0.87	–34 %
Ventilyatsiya energiya sarfi	100 %	88.6 %	–11.4 %
Xavfni yo'qotishga ketgan vaqt	52 s	32 s	–38 %

Ko'rinib turibdiki, adaptiv yondashuv nafaqat xavfsizlik parametrlarini barqarorlashtiradi, balki ventilyatsiya tizimining umumiy energiya tejamkorligini sezilarli darajada oshiradi. Tizimning yana bir muhim jihati shaxsiy xavf indeksining hisoblanishidir. TDoA lokatsiyasi asosida har bir ishchi mos zona bilan bog'lanadi va uning individual xavf indeksi $R_n^{\text{pers}}(t)$ doimiy ravishda kuzatiladi. Simulyatsiya jarayonida ishchi xavfli zonaga yaqinlashganda indeksning tez o'sishi qayd etilib, u kritik qiymatga yetmasdan **10–15 soniya avval** ogohlantirish signali shakllandi. Bu esa xodimlarni oldindan ogohlantirish tizimining samaradorligini, ya'ni odam omiliga bog'liq xavflarni kamaytirishdagi ustunliklarini ko'rsatadi.



3-rasm. Ishchining xavf zonaga yaqinlashish bo'yicha xavf indeksi.

Yig'ma natijalar shuni ko'rsatadiki, multisensor monitoring, TDoA lokatsiya va adaptiv ventilyatsiya algoritmlarining integratsiyasi orqali yer osti konlaridagi xavf zonalarini aniqlashning aniqligi oshadi, aerodinamik jarayonlarning barqaror boshqaruvi



ta'minlanadi, global xavf indeksi $R^{\text{glob}}(t)$ minimal darajada ushlab turiladi va ventilyatsiya energiya sarfi optimallashtiriladi. Ushbu yondashuv aqlii shaxta konsepsiyasiga mos keluvchi yuqori darajadagi kiber-fizik xavfsizlik arxitekturasini shakllantirishga xizmat qiladi [21-26].

Xulosa

Olib borilgan tadqiqot yer osti konlarida xavfsizlikni oshirishga qaratilgan intellektual adaptiv ventilyatsiya boshqaruv tizimini shakllantirish bo'yicha kompleks ilmiy yondashuvni taklif etdi. TDoA algoritmlari yordamida ishchi va texnikaning fazoviy lokatsiyasini yuqori aniqlikda aniqlash, multisensor monitoring asosida konning aerodinamik va gaz muhitidagi o'zgarishlarni real vaqt rejimida baholash, shuningdek, xavf indeksiga asoslangan adaptiv ventilyatsiya boshqaruvi orqali kon ichida xavfli zonalarining erta aniqlanishi ta'minlandi.

Natijalar shuni ko'rsatadiki, taklif etilgan adaptiv ventilyatsiya modeli konchilik sanoatida xavfsizlikni sezilarli darajada oshirishga, avariya holatlar xavfini kamaytirishga va ventilyatsiya resurslaridan samarali foydalanishga xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Qiao X. Underground location algorithm based on random forest for coal mine // International Journal of Coal Science & Technology. – 2021. – DOI: 10.1007/s40789-021-00418-4.
2. Liu H., Wang Y., Li X. A review of positioning technologies for personnel and assets in underground mines // International Journal of Digital Earth. – 2025. – Advance online publication.
3. Kalandarov I.I., Namozov N. N. Yer osti konlarida xodimlarni xavfsizligini ta'minlash individual qurilmalaridagi signallar kechikish vaqtini aniqlash modeli // Journal of Advances in Engineering Technology. – 2024. – №. 1. – C. 33—36.
4. Kalandarov I., Namozov N., Bozorov B. Analyses and algorithms of personnel safety in mines using event tree and Bayesian network method // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – T. 531. – C. 03018.
5. Ban Y., Li Y. Design and implementation of mine ventilating safety monitoring system // Proc. of 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. – 2018. – Pp. 421–428.
6. Kalandarov I.I., Namozov N.N., Nasimov R. Testing the Technology and Reliability of Using the Zigbee Network in Underground Mining Operations. In: Koucheryavy, Y., Aziz, A. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. ruSMART NEW2AN 2024 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 15555. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95296-8_14
7. Niu Q., Li X., Li Y., et al. Image-assisted person localization for underground coal mine // Sensors. – 2018. – Vol. 18, No. 11. – Art. 3679.
8. Kalandarov I., Namozov N.N. LoRa signallari yordamida yer osti kon ishlarida xodimlar harakatlanish traektoriyasini aniqlash modeli // Digital transformation and artificial intelligence. – 2023. – T. 1. – №. 4. – C. 146—148.
9. Niu Q., Li X., Li Y., et al. Image-assisted person localization for underground coal mine // Sensors. – 2018. – Vol. 18, No. 11. – Art. 3679.
10. Vakhromeev A. G. et al. Geoecological monitoring of the "Mustaqillikning 25 yilligi" gas field // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – T. 417. – C. 04007.



11. Kalandarov I., Namozov N., Bozorov B. Yer osti kon ishlarida xodimlar xavfsizligini ta'minlash tizimlari tahlili //Innovatsion texnologiyalar. – 2023. – T. 52. – №. 04.
12. Qiao X. Coal mine underground positioning algorithm based on RSSI model correction and node cooperation // Applied Mining Sciences. – 2025. – 1(1).
13. Kabulov A. et al. Control System and Algorithm for Construction of Optimal Technological Routes for Machining Parts in the Machining Shop //International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry “Interagromash”. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – C. 2566—2574.
14. Каландаров И.И. и др. Преобразователь передачи информации в информационную систему контроля горюче—смазочных материалов //Journal of advances in engineering technology. – 2022. – №. 3. – С. 5—8.
15. Namozov N. N. Tog ‘—kon sanoatida piyodalar va transport vositalari o ‘rtasida to ‘qnashuvlarini oldini olish usullari va sun’iy intellekt texnologiyasining o ‘rni //Indexing. – 2024. – T. 1. – №. 1.
16. Zhu H., Jin J., Zhao S. Research on multi-sensor data fusion based real-scene 3D reconstruction and digital twin visualization methodology for coal mine tunnels // Sensors. – 2025. – Vol. 25, No. 19. – Art. 6153.
17. Namozov N.N. Database and Structure Modeling of Personnel Safety Management Information System //Indexing. – 2024. – T. 1. – №. 1.
18. Yu Y., Zhang Y. Remote data communication technology of coal mine safety monitoring system based on multi-sensor data fusion // Energy and Environment Research Journal. – 2013. – Vol. 3, No. 1. – Pp. 17–24.
19. Намозов Н.Н. Анализ систем предотвращения столкновений транспортных средств на подземных месторождениях //Ответственный редактор. – 2024. – С. 60.
20. Xu G., Luxbacher K., Ragab A. Development of a remote analysis method for underground ventilation systems using tracer gas and CFD in a simplified laboratory apparatus // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2013. – Vol. 35. – Pp. 30–42.
21. Namozov N.N. Kon sanoatida xodimlar xavfsizligini ta'minlashda xavf omillarini ekstrapolyatsion tahlil asosidagi matematik modeli //Journal of Advances in Engineering Technology. – 2024. – №. 3. – С. 126—130.
22. Namozov N.N. Datchik qurilmalaridan olingan ma'lumotlarni qayta ishlashda neyron tarmoqlarining matematik va cnn arxitektura modellar tahlili //International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. – 2025. – T. 6. – №. 1. – С. 68—75.
23. Aminossadati S.M., Hooman K. Numerical simulation of ventilation air flow in underground mine workings // PhD Thesis. – The University of Queensland, 2008.
24. Kalandarov I. I., Namozov N.N. A model for ensuring the safety of personnel operating in underground mines using the linear extrapolation method //International conference on analysis of mathematics and exact sciences. – 2024. – T. 1. – №. 1. – С. 121—125.
25. Kalandarov I.I., Khojiev A.H., Namozov, N.N., & Khayrullayev, M. Mathematical Model and Algorithm for Calculating Natural and Geological Conditions Affecting the Safety of Workers in Underground Mining //Proceedings of the 8th International Conference on Future Networks & Distributed Systems. – 2024. – С. 394—397.
26. Panigrahi D. C., Mishra D. P. CFD simulations for the selection of an appropriate blade profile for mine ventilation fans // Journal of Sustainable Mining. – 2014. – Vol. 13, No. 3. – Pp. 17–23.