KON YO‘LLARIDA HAVO OQIMLARINING AERODINAMIK PARAMETRLARINI ANIQLASHNING KO‘P DARAJALI MODELI

Kalandarov Ilyos[1], Toxtamishova Malika[2]

[1]Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti
[2]O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Navoiy bo‘limi,
E-mail: malikatoxtamishova7@gmail.com, kalandarovilyos1987@gmail.com

KEYWORDS

kon aerodinamikasi, aerodinamik qarshilik, hisoblash gidrodinamikasi, k – ω SST modeli, ventilyatsiya tarmog‘i, energiya samaradorligi

ABSTRACT

Kon ishlarining chuqurligi ortishi natijasida shamollatish tizimlarida aerodinamik jarayonlarni aniq baholash zaruriyati kuchaymoqda. Mavjud bir o‘lchovli tarmoq modellari havo oqimining fazoviy xususiyatlarini to‘liq ifodalamaydi, uch o‘lchovli modellashtirish natijalari esa tarmoq hisoblariga tizimli integratsiya qilinmaydi, sun’iy intellektga asoslangan usullar esa boshlang‘ich ma’lumotlar sifatiga bog‘liq bo‘lib qolmoqda.

Tadqiqotning maqsadi aerodinamik parametrlarni aniqlashning ko‘p darajali modelini hamda darajalararo parametrlarni ikki tomonlama uzatish mexanizmini ishlab chiqishdan iborat. Tadqiqotda Reynolds bo‘yicha o‘rtachalashtirilgan Navye-Stoks tenglamalari, k – ω Shear Stress Transport (SST) turbulentlik modeli hamda surrogat modellashtirish usullari qo‘llanildi. Natijada uch darajali (makro-, mezo- va prognoz darajasi) hisoblash modeli, aerodinamik qarshilikni uch o‘lchovli hisobdan aniqlash algoritmi va uning tarmoq modeliga uzatish usuli taklif etildi. Ilmiy yangilik parametrlarning ikki tomonlama almashinuviga asoslangan integratsiyalashgan yondashuv orqali empirik qarshilik koeffitsiyentlariga bog‘liqlikni kamaytirishdan iborat bo‘lib, unda chuqurlik omili - zichlikning barometrik va termik o‘zgarishi hamda tabiiy tortish - yagona hisob zanjiriga birlashtiriladi. Taklif etilgan model shamollatish tarmoqlarining energiya samaradorligini baholash, yuqori energiya yo‘qotishlariga ega uchastkalarni aniqlash va texnik yechimlarni maqsadli yo‘naltirish imkonini beradi.

KIRISH

Kon qazib olish ishlarining tobora chuqurlashuvi yer osti shamollatish tizimlarining aerodinamik va energiya samaradorligi ko‘rsatkichlarini sezilarli darajada murakkablashtirmoqda. Chuqur gorizontlarda havo yo‘llarining uzayishi integral aerodinamik qarshilikning ortishiga, geotermik gradiyent ta’sirida havo zichligining ventilyatsiya tarmog‘i elementlari bo‘ylab fazoviy o‘zgarishiga hamda tabiiy tortish natijasida yuzaga keluvchi depressiyaning shamollatish tizimi energetik balansiga ta’siri ortadi. Bunday sharoitlarda shamollatish tarmog‘ining bir gorizont uchun ishlab chiqilgan hisoblash sxemasini boshqa gorizontlarga bevosita qo‘llash yetarli aniqlikni ta’minlamaydi. Shu sababli aerodinamik parametrlarni konning real ekspluatatsiya sharoitlarini hisobga olgan holda aniqlash dolzarb ilmiy va amaliy vazifalardan biri hisoblanadi.

Ishlab chiqarish sharoitida olingan ma’lumotlar ushbu muammoning amaliy ahamiyatini tasdiqlaydi. Oltin rudali konlarda o‘tkazilgan aerologik o‘lchovlar natijalariga ko‘ra, shamollatish tizimiga uzatilayotgan 119,6 m³/s havoning 22,0 m³/s (18,39 %) qismi ichki yo‘qotishlarga sarflanadi [1]. Tajriba natijalari tez o‘rnatiladigan ventilyatsiya to‘siqlaridan foydalanish orqali havo yo‘qotishlarini 18–25 % dan 8–10 % gacha kamaytirish va asosiy ventilyator qurilmasining qo‘shimcha energiya sarfini sezilarli qisqartirish mumkinligini ko‘rsatadi [1]. Bu holat shamollatish tizimining energiya samaradorligini oshirish zaxiralari, avvalo, tarmoqning aerodinamik va gidravlik parametrlarini optimallashtirish bilan bog‘liqligini ko‘rsatadi.

Ventilyatsiya tarmoqlarini hisoblashning mavjud nazariy asoslari minimum energiya prinsipi hamda statsionar havo taqsimoti modellariga tayanadi [2, 3]. Keyingi tadqiqotlarda

(cc) BY

ventilyatsiya regulyatorlari parametrlarini genetik algoritmlar yordamida optimallashtirish usullari ham taklif etilgan [4]. Yer osti inshootlari aerologiyasi va shamollatish jarayonlarining klassik nazariy asoslari bir qator monografiyalarda batafsil bayon etilgan [5, 6]. Biroq ushbu yondashuvlarning aksariyatida kon yo‘llari yagona empirik aerodinamik qarshilik koeffitsiyenti bilan tavsiflanadigan konsentrlangan element sifatida qaraladi. Natijada havo oqimining fazoviy tuzilishi, oqim strukturasining mahalliy buzilishlari va kon lahimlarining geometrik xususiyatlari ta’siri yetarli darajada hisobga olinmaydi.

Hisoblash gidrodinamikasi (CFD) usullarining rivojlanishi kon yo‘llarida havo oqimining uch o‘lchovli tuzilishini yuqori aniqlikda modellashtirish imkonini yaratdi [7]. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, Reynolds bo‘yicha o‘rtachalashtirilgan Navye-Stoks tenglamalariga asoslangan $k-\varepsilon$ va $k-\omega$ SST turbulentlik modellari ventilyatsiya masalalarini yechishda eng keng qo‘llaniladigan yondashuvlar hisoblanadi [8–10]. Shu bilan birga, sun’iy intellekt, mashinali o‘qitish va raqamli egizak texnologiyalariga asoslangan yechimlar aerodinamik parametrlarni prognozlash imkoniyatlarini oshirayotgan bo‘lsada, ularning aniqligi boshlang‘ich aerodinamik ma’lumotlarning ishonchliligiga bevosita bog‘liq [11–14].

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, ventilyatsiya tarmog‘i modellari, uch o‘lchovli CFD modellashtirish va sun’iy intellektga asoslangan prognozlash usullari hozirgi kunga qadar asosan mustaqil rivojlanib kelgan. Tarmoq modellari butun shamollatish tizimini tavsiflasada, lokal aerodinamik jarayonlarni aks ettirmaydi. Aksincha, uch o‘lchovli CFD modellar mahalliy oqim xususiyatlarini yuqori aniqlikda ifodalasa ham, ularning natijalari ventilyatsiya tarmog‘i hisoblariga tizimli ravishda integratsiya qilinmaydi. Sun’iy intellekt usullari esa hisoblash vaqtini qisqartiradi, biroq modelning ishonchliligi sifatli aerodinamik ma’lumotlar bazasiga bog‘liq bo‘lib qolmoqda.

Demak, shamollatish tizimlarini modellashtirishda asosiy ilmiy muammo tarmoq modeli, uch o‘lchovli CFD modeli va raqamli prognozlash vositalari o‘rtasida aerodinamik parametrlarni uzatishning yagona mexanizmi ishlab chiqilmaganligidadir. Aynan ushbu ilmiy bo‘shliq ventilyatsiya tarmoqlarida empirik qarshilik koeffitsiyentlaridan foydalanish zaruratini saqlab qolmoqda va hisoblash natijalarining aniqligini cheklaydi.

Shu munosabat bilan tadqiqotning maqsadi kon shamollatish tizimlari uchun aerodinamik parametrlarni aniqlashning ko‘p darajali modelini ishlab chiqish hamda tarmoq modeli bilan uch o‘lchovli CFD modeli o‘rtasida parametrlarni ikki tomonlama uzatish mexanizmini taklif etishdan iborat. Tadqiqotning ilmiy farazi shundan iboratki, tarmoq modelidan uch o‘lchovli modelga chegaraviy shartlarni, teskari yo‘nalishda esa ekvivalent aerodinamik qarshilik parametrlarini uzatishga asoslangan integratsiyalashgan yondashuv empirik qarshilik koeffitsiyentlariga bog‘liqlikni kamaytiradi va shamollatish tizimlarining aerodinamik hisoblash aniqligini oshiradi.

METODLAR

Havo oqimining harakati uzluksiz muhit mexanikasi qonunlari asosida tavsiflanadi va past Mach sonli, biroq zichligi fazoviy o‘zgaruvchan bo‘lgan siqiluvchan oqim sifatida qaraladi. Bunday sharoitda massa, impuls va energiyaning saqlanish qonuni oqim parametrlarining o‘zaro bog‘lanishini ifodalovchi differensial tenglamalar tizimi orqali yoziladi:

$$\partial\rho/\partial t + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{u_j \partial u_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \ (2)$$

$$\rho c_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u_j \partial T}{\partial x_j}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j\left(\frac{\lambda \partial T}{\partial x_j}\right)} + \Phi + q_v \qquad (3)$$

bu yerda ρ— zichlik, kg/m^3; u — tezlik, m/s; P — bosim, Pa; τ_{ij} — yopishqoq kuchlanishlar tenzori, Pa; T — harorat, K; c_P — solishtirma issiqlik sig‘imi, $J/kg \cdot K$; λ — issiqlik o‘tkazuvchanlik, $W/(m \cdot K)$; Φ — yopishqoq dissipatsiya va q_v— hajmiy issiqlik manbai, W/m^3. (2) tenglamadagi ρg_i gravitatsion hadi vertikal stvollarda tabiiy tortish kuchi ta’sirini aks ettiradi, (3) tenglamadagi q_v manbali had esa geotermik issiqlik almashinuv jarayonlarini tavsiflaydi. Mazkur tenglamalar tizimi holat tenglamasi

(cc) BY

yordamida to‘ldiriladi va oqimning termodinamik parametrlari o‘rtasidagi o‘zaro bog‘lanishni ta’minlaydi.

$$\rho = P/[R_\alpha T(1 + 0{,}608d)] \quad (4)$$

bu yerda R_α-gaz doimiysi, $J/(kg \cdot K)$; d – namlik ulushi, kg/kg. Tabiiy tortish depressiyasi chiqarish va kiritish stvollaridagi havo ustunlari og’irligining farqidan kelib chiqadi:

$$h_e = g \int (\rho_{ch} - \rho_k) dz \quad (5)$$

Oqim rejimi Reynolds soni bilan aniqlanadi, $R_e = \rho u D_h/\mu$, bu yerda gidravlik diametr $D_h = 4S/P$ (S — kesim yuzasi, m^2; P — perimetr, m). Kon yo‘llari uchun tipik qiymatlarda ($u = 1 - 8$ m/s, $D_h = 2 - 5$ m) $R_e = 10^5 - 10^6$ diapazonda shakllanadi, ya’ni oqim doimo rivojlangan turbulent rejimda va laminar model qo‘llanilmaydi.

Makrodaraja: shamollatish tarmog’i modeli. Ventilyatsiya tarmog‘i yo‘naltirilgan graf ko‘rinishida modellashtiriladi. Ishqalanish yo‘qotishlari Darcy–Weisbach formulasidan Atkinson ko‘rinishiga keltiriladi:

$$h = RQ^2, R = \alpha PL/S^3 \quad (6)$$

bu yerda h — depressiya, Pa; R — aerodinamik qarshilik, $N \cdot s^2/m^8$; Q — havo sarfi, m^3/s; α — qarshilik koeffitsiyenti; L — uzunlik, m. Qarshilik kesim yuzasining uchinchi darajasiga teskari proporsional (1-rasm), shu bilan birga butun murakkab fizika bitta empirik α koeffitsiyentiga siqilgan — bu modelning zaif nuqtasi. Tarmoq masalasi tugunlardagi massa balansi va konturlardagi energiya balansi bilan yopiladi:

$$\sum \varepsilon_j Q_j = 0, \sum \varepsilon_j R_j Q_j^2 = \sum h_{v,j} + h_{e,k} \quad (7)$$

bu yerda ε_j — oqim yo‘nalishi koeffitsiyenti; h_v — ventilyator depressiyasi, Pa. Ventilyator xarakteristikasi polinom bilan approksimatsiyalanadi, $h_v = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2$; amaliy hisoblar uchun uch had yetarli [1]. Tizim Hardy Cross iteratsiyasi bilan yechiladi:

$$\Delta Q_k = \sum \varepsilon_j R_j Q_j^2 - \sum h_{v,j} - h_{e,k})/(2 \sum R_j |Q_j|) \quad (8)$$

Mezodaraja: uch o‘lchovli model. O‘zgaruvchan zichlikli statsionar turbulent oqim uchun Favre bo‘yicha o‘rtachalashtirilgan tenglamalar qabul qilinadi. Turbulentlik $k - \omega$ SST modeli bilan yopiladi, unda turbulent yopishqoqlik quyidagicha aniqlanadi:

$$\mu_t = \rho a_1 k/max(a_1 \omega, SF_2) \quad (9)$$

bu yerda $a_1 \approx 0{,}31$ — model konstantasi; k — turbulent kinetik energiya, m^2/s^2; ω — solishtirma dissipatsiya tezligi, $1/s$; S — deformatsiya tezligi tenzorining moduli, $1/s$; F_2 — aralashtiruvchi funksiya. Maxrajdagi max operatori teskari bosim gradiyenti sharoitida turbulent yopishqoqlikni chegaralaydi va ajralish nuqtasini aniq bashorat qilish imkonini beradi. Model tanlovi 1-jadval bo‘yicha asoslangan: kon yo‘llarida yo‘qotishlarning muhim qismi tarmoqlanish tugunlarida va kesim o‘zgarishi zonalarida, ya’ni oqim ajralishi kutiladigan sohalarda shakllanadi.

1-jadval.

Turbulentlik modellarini kon yo‘llari sharoitida qiyosiy baholash

Model	Kuchli tomoni	Cheklovi
Standart $(k - \varepsilon)$	Turg‘unlik, past hisoblash xarajati	Devorosti va ajralish zonasida past aniqlik
Standart $(k - \omega)$	Devorosti sohasida yuqori aniqlik	Erkin oqimda kirish shartlariga sezgirlik
$(k - \omega)$ SST	Devor va yadro sohalarini birlashtiradi; ajralishni aniq bashorat qiladi	Nozikroq to‘r talab qiladi ($y^+ \approx 1$)
LES	Nostatsionar tuzilmalarni ochib beradi	Hisoblash xarajati RANS ga nisbatan 2–3 tartibga yuqori

(cc) BY

Uch o‘lchovli aerodinamik modelda chegaraviy shartlar tarmoq hisoblash natijalari asosida belgilanadi. Kirish chegarasida tarmoq modelidan aniqlangan havo tezligining kesim bo‘yicha taqsimoti beriladi, chiqishda esa rivojlangan oqim sharti qabul qilinadi. Devorlarda yopishmaslik sharti va k_s g‘adir-budurlik parametri asosida devor funksiyasi qo‘llaniladi. Devor g‘adir-budurligini hisobga olish kon lahimi sirt xususiyatlari bilan empirik aerodinamik qarshilik koeffitsiyenti α o‘rtasidagi fizik bog‘lanishni aniqlash imkonini beradi. Issiqlik chegaraviy sharti geotermik gradiyent asosida belgilanib, boshlang‘ich bosim taqsimoti barometrik tenglama orqali aniqlanadi:

$$P_0(z) = P_s \cdot exp[-\int gdz'/(R_\alpha T(z'))] \qquad (10)$$

Darajalararo bog‘lanish. Model o‘zagi ikki yo‘nalishli parametrlar uzatishdadir. To‘g‘ri uzatishda tarmoq hisobidan olingan sarf va depressiya mezodaraja uchun chegaraviy shart bo‘ladi. Teskari uzatishda uch o‘lchovli hisob natijasidan uchastkaning ekvivalent qarshiligi ajratib olinadi:

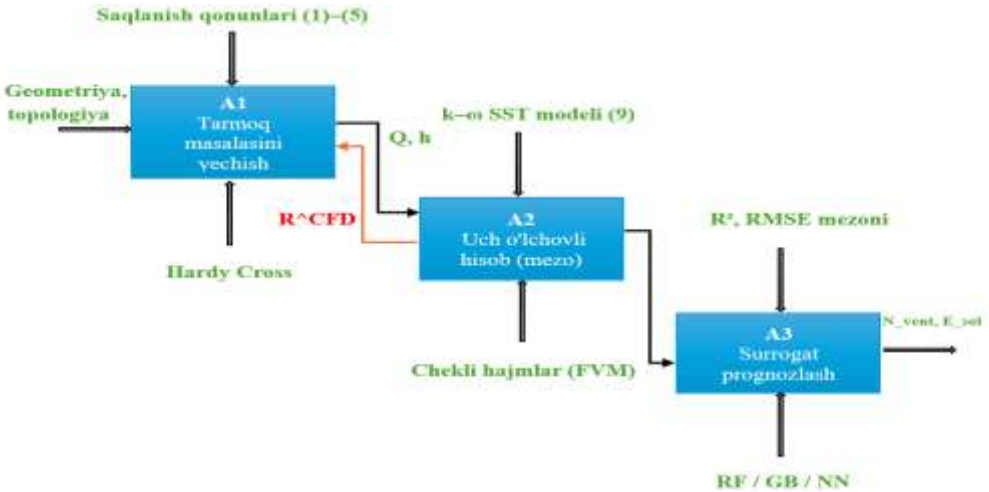
$$R_j^{CFD} = (\bar{P}_{kirish} - \bar{P}_{chiqish})/Q_j^2 \qquad (11)$$

Bu miqdor tarmoq modeliga qaytariladi va (6) dagi jadvalli α o‘rniga qo‘yiladi; iteratsiya $\max \left|R_j^{(n+1)} - R_j^{(n)}\right|/R_j^{(n)} < \delta_R$ sharti bajarilgunga qadar davom etadi ($\delta_R = 0{,}02$). Ventilyator xarakteristikasi standart zichlik uchun berilgani sababli haqiqiy zichlikka keltiriladi, $h_v^{haq} = h_v^{std} \cdot \rho(z)/\rho_0$.Yechim sifati integral ko‘rsatkich bilan baholanadi:

$$N_{vent} = \sum \frac{h_{v,j} Q_j}{\eta_{v'} E_{sol}} = N_{vent}/Q_{umumiy} \ (12)$$

bu yerda $\eta_{v'}$ — foydali ish koeffitsiyenti; E_{sol} — solishtirma energiya sarfi, $W \cdot s/m^3$, ventilyatsiya rejimlarini taqqoslash mezoni.

Prognoz darajasi. Uch o‘lchovli hisobning har bir sikli sezilarli vaqt talab qilgani sababli operativ boshqaruv uchun surrogat model qo‘llaniladi: ko‘p variantli hisoblar seriyasi asosida kirish parametrlaridan (kesim yuzasi va perimetri, gidravlik diametr, uzunlik, mustahkamlash turi, havo sarfi, harorat) chiqish ko‘rsatkichlariga (ekvivalent qarshilik, o‘rtacha va maksimal tezlik) aks ettiruvchi funksiya o‘rgatiladi. Random Forest belgilar ahamiyatini baholash uchun, gradiyent busting nochiziqli bog‘liqliklar uchun, neyron tarmoq esa uzluksiz ko‘p o‘lchovli aks ettirish uchun qo‘llaniladi; sifat R^2, RMSE, MAE va MAPE bo‘yicha kross-validatsiyada baholanadi. Surrogat modelning aniqligi manba modelining aniqligidan yuqori bo‘la olmaydi va o‘quv tanlanmasi chegarasidan tashqarida ekstrapolyatsiya asoslanmagan [11]. 1-rasmda tizimning funksional tuzilishi IDEF0 metodologiyasi asosida keltirilgan. Model A1 (tarmoq hisobi), A2 (uch o‘lchovli hisob) va A3 (surrogat prognozlash) funksiyalaridan tashkil topgan. Boshqaruv sifatida saqlanish qonunlari, $k-\omega$ SST modeli va prognozlash mezonlari, mexanizm sifatida Hardy Cross iteratsiyasi, chekli hajmlar usuli hamda mashinali o‘qitish algoritmlaridan foydalanilgan. A1 va A2 o‘rtasidagi Q, h va $R \wedge CFD$ almashinuvi modelning asosiy funksional bog‘lanishini ifodalaydi.



1-rasm. Ko‘p darajali modelning funksional tuzilishi.

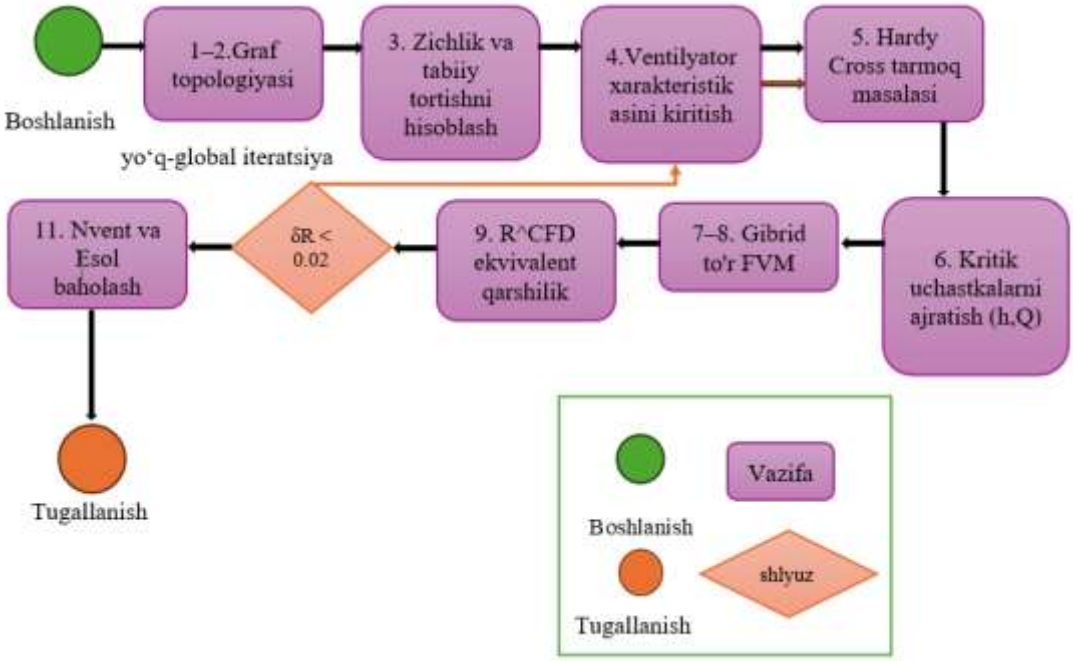
(cc) BY

NATIJALAR

Hisoblash algoritmi. Modelning amaliy tatbiqi o‘n bir bosqichli algoritm orqali amalga oshiriladi (2-jadval). Uning asosiy farqli jihati 9–10-bosqichlarda uch o‘lchovli hisob natijalarining tarmoq modeliga qayta uzatilishi va global iteratsion yechimning tashkil etilishidir. Bu mexanizm lokal aerodinamik xususiyatlarni makrodarajadagi shamollatish tarmog‘i hisobiga kiritish imkonini beradi.

№	Bosqich mazmuni	Ifodalar
1	Tarmoq topologiyasini graf ko‘rinishida rasmiylashtirish	—
2	Shoxobchalarga dastlabki qarshilikni jadvalli α bo‘yicha tayinlash	(6)
3	Zichlik maydonini va tabiiy tortish depressiyasini hisoblash	(4), (5), (10)
4	Ventilyator xarakteristikalarini haqiqiy zichlikka keltirish	(12) izohi
5	Tarmoq masalasini iteratsion yechish	*(7), (8)*
6	Energiya dissipatsiyasi yuqori bo‘lgan kritik uchastkalarni ajratish	$h_j Q_j - ulushi$
7	Gibrid hisoblash to‘rini qurish; to‘r mustaqilligini tekshirish	$y^+ \approx 1$
8	Mezodaraja tenglamalarini chekli hajmlar usuli bilan yechish	*(9)*
9	Ekvivalent qarshilikni ajratish va tarmoq modeliga qaytarish	*(11)*
10	5–9 bosqichlarni yaqinlashish shartigacha takrorlash	$\delta_R = 0{,}02$
11	Ventilyatsiya quvvati va solishtirma energiya sarfini baholash	*(12)*

2-rasmda algoritmning bajarilish ketma-ketligi BPMN jarayon modeli ko‘rinishida keltirilgan. Model vazifalar, hodisalar va qaror shlyuzidan iborat bo‘lib, $\delta_R < 0{,}02$ sharti asosida global iteratsiya yoki yakuniy baholash bosqichiga o‘tishni ta'minlaydi. Natijada algoritmning boshqaruv mantig‘i va teskari aloqa mexanizmi aniq ifodalanadi.

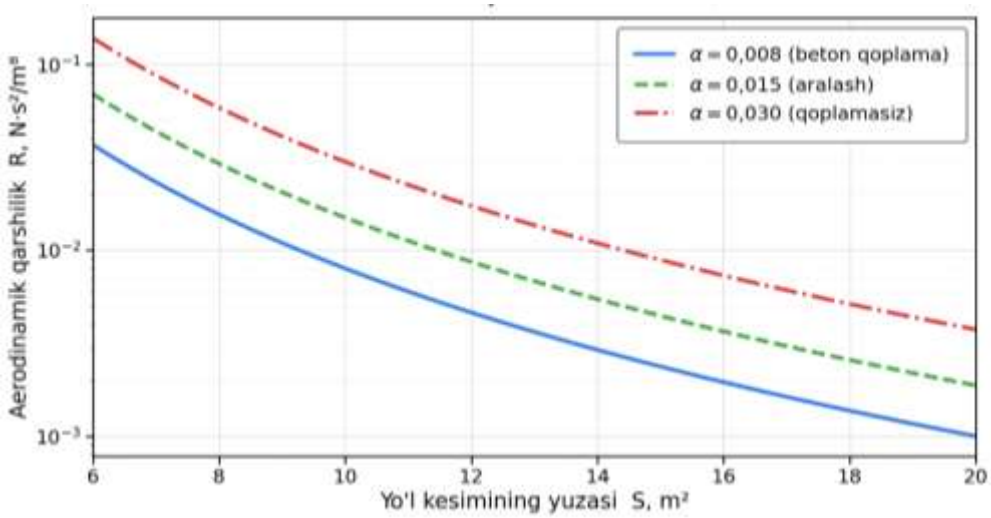


2-rasm. Hisoblash algoritmining BPMN jarayon modeli (global iteratsiya sikli bilan)

Model makrodarajada havo sarfi, depressiya va tabiiy tortishni, mezodarajada esa tezlik, bosim, turbulent kinetik energiya hamda harorat taqsimotini aniqlaydi. Shuningdek, ventilyatsiya quvvati va solishtirma energiya sarfi baholanadi. Makro va mezodarajada hisoblangan aerodinamik qarshiliklar o‘rtasidagi farq modelning yaqinlashish mezoni sifatida qabul qilinadi.

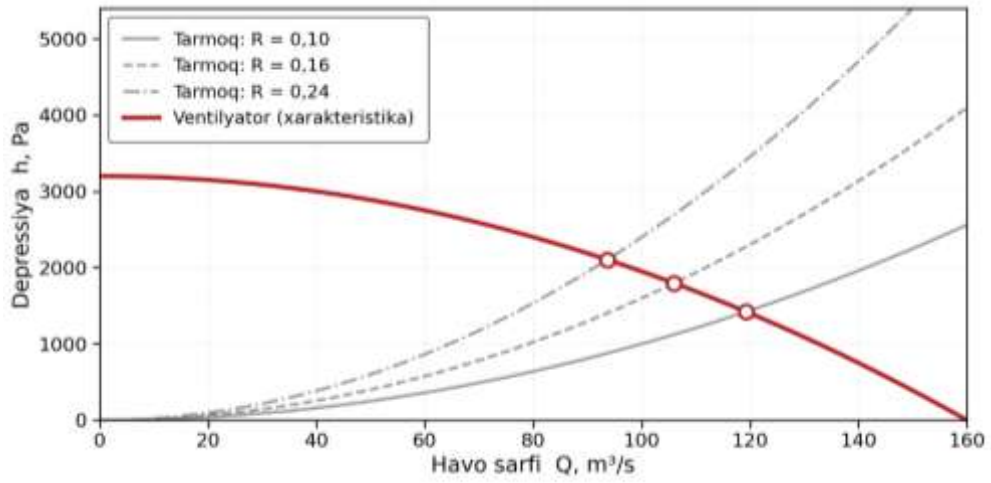
(cc) BY

ISSN: 3030-3346



3-rasm. Aerodinamik qarshilikning kesim yuzasiga bog‘liqligi (6-ifoda bo‘yicha, L = 1000 m)

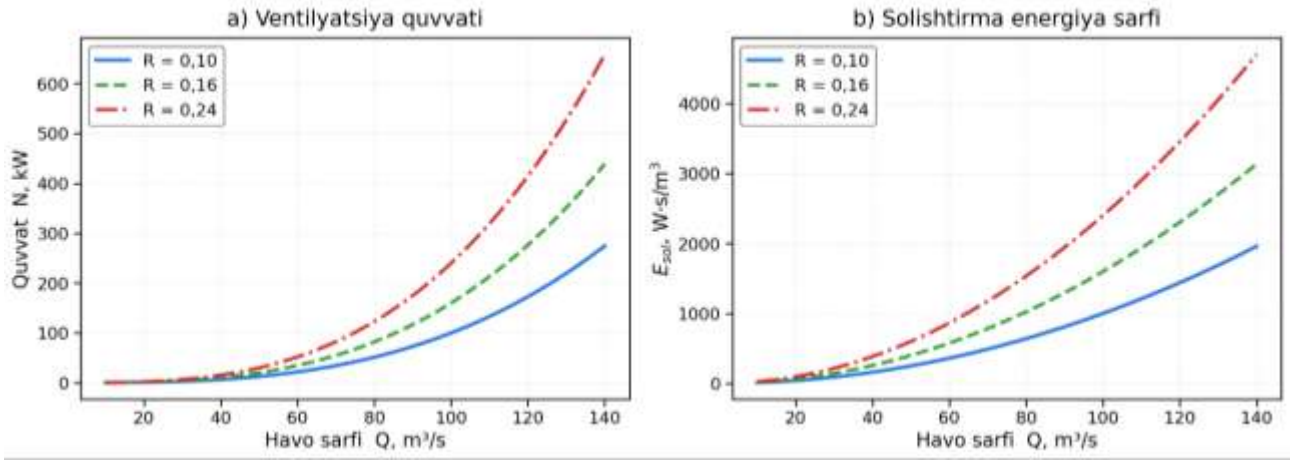
3-rasm aerodinamik qarshilikning kesim yuzasiga teskari bog‘liqligini ko‘rsatadi. Kesim yuzasining ortishi qarshilikni kamaytirib, tizimning energetik samaradorligini oshiradi. Egri chiziqlar orasidagi tafovut empirik α koeffitsiyentining noaniqligini ifodalab, u taklif etilgan ko‘p darajali model asosida (11) ifoda yordamida kamaytiriladi.



4-rasm. Tarmoq va ventilyator xarakteristikalarining kesishuvi: ish nuqtasining shakllanishi

Tarmoq va ventilyator xarakteristikalarining kesishish nuqtasi tizimning ish rejimini aniqlaydi (4-rasm). Aerodinamik qarshilikning ortishi ish nuqtasini kichik havo sarfi tomon siljitadi, natijada bir xil ventilyator sharoitida kon tarmog‘iga beriladigan havo miqdori kamayadi. Qarshilikni kamaytirish esa ventilyator parametrlarini o‘zgartirmasdan havo taqsimotini yaxshilash imkonini beradi [1].

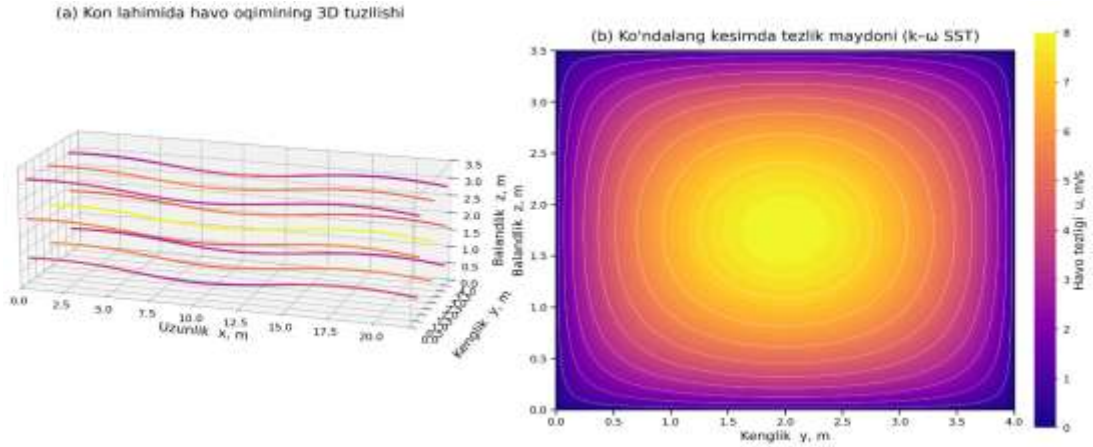
(cc) BY



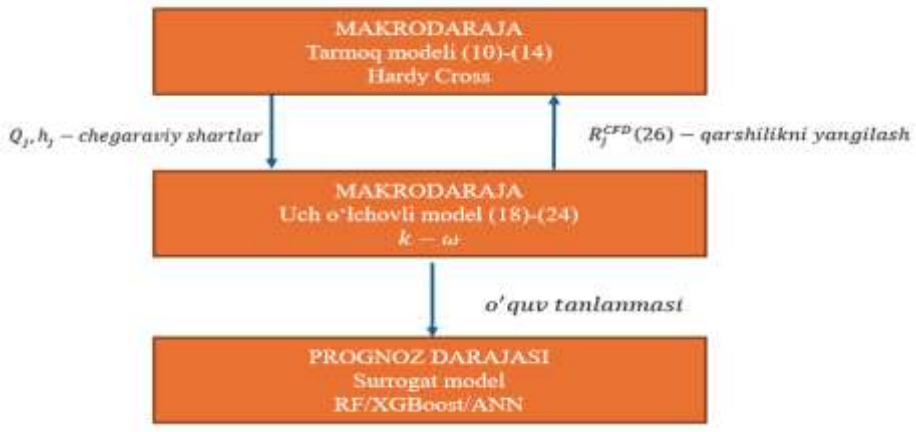
5-rasm. Ventilyatsiya quvvati va solishtirma energiya sarfi (12-ifoda; ηv = 0,72)

Ventilyatsiya quvvatining havo sarfiga kubik bog‘liqligi energiya tejash zaxirasining manbaini ochib beradi (5-rasm): sarfning 20 foizga ortishi quvvatni deyarli 73 foizga oshiradi. Shuning uchun havo yo‘qotishlarini kamaytirish orqali foydali sarf ulushini oshirish ventilyator unumdorligini oshirishga nisbatan ancha tejamkorroq strategiya hisoblanadi.

6-rasmda mezodarajadagi uch o‘lchovli hisob natijalari havo oqimining fazoviy tuzilishi sifatida keltirilgan. Tezlik taqsimoti oqim yadrosida yuqori, devor yaqinida esa chegaraviy qatlam ta'sirida past qiymatlarni ko‘rsatadi. Devor yaqinidagi tezlik gradiyenti g‘adir-budurlik parametri k_s orqali empirik aerodinamik qarshilik koeffitsiyenti α ni aniqlash uchun asos bo‘lib xizmat qiladi.



6-rasm. Kon lahimida havo oqimining 3D tuzilishi (a) va ko‘ndalang kesimdagi tezlik maydoni (b)



7-rasm. Model darajalari va parametrlarni ikki tomonlama uzatish sxemasi

(cc) BY *dtai.uz*

Modelning umumiy tuzilishi 7-rasmda umumlashtirilgan: makrodarajadan mezodarajaga sarf va depressiya chegaraviy shart sifatida uzatiladi, teskari yo‘nalishda esa (11) bo‘yicha hisoblangan ekvivalent qarshilik tarmoq modelidagi jadvalli koeffitsiyentni almashtiradi.

MUNOZARA

Turbulentlik modelini tanlash masalasida $k-\varepsilon$ va $k-\omega$ SST modellari keng qo‘llaniladi [8], biroq ularning samaradorligi masalaning fizik xususiyatlariga bog‘liq [9, 10]. Mazkur tadqiqotda $k-\omega$ SST modeli oqim ajralishi va teskari bosim gradiyenti mavjud bo‘lgan kon lahimlari uchun mosligi sababli tanlandi.

Taklif etilgan yondashuvda aerodinamik qarshilik koeffitsiyenti α empirik jadval qiymatlari asosida emas, balki uch o‘lchovli hisob natijalaridan aniqlanadi. Bu usul murakkab geometrik va ekspluatatsion sharoitlarda qarshilik parametrlarini aniqroq baholash imkonini beradi. Surrogat model esa fizik hisoblashni almashtirmasdan, uning natijalari asosida tezkor prognozlash vositasi sifatida qo‘llaniladi.

Ilmiy yangilik tarmoq va uch o‘lchovli modellar o‘rtasida ikki tomonlama parametr almashinuvi, chuqurlik ta’sirini (zichlik, tabiiy tortish va termik omillar) yagona hisoblash tizimida hisobga olish hamda fizik model va prognoz modelining funksiyalarini ajratishda namoyon bo‘ladi. Bunday ajratish fizik ishonchlilik bilan hisoblash tezligini bir vaqtda ta’minlash imkonini beradi: yuqori aniqlikni talab qiluvchi masalalar mezodarajada, operativ boshqaruv talab qiluvchi masalalar esa prognoz darajasida yechiladi.

Olingan natijalar mavjud tadqiqotlar bilan izchil bo‘lib, ularni to‘ldiradi. Adabiyotlarda [8–10] uch o‘lchovli CFD modellashtirish lokal oqim xususiyatlarini yuqori aniqlikda ifodalashi ko‘rsatilgan bo‘lsa-da, ushbu natijalarni tarmoq hisobiga tizimli qaytarish mexanizmi taklif etilmagan edi. Sun’iy intellektga asoslangan ishlarda [11–14] esa prognoz aniqligi o‘quv ma’lumotlari sifatiga bog‘liqligi qayd etilgan. Mazkur tadqiqotda taklif etilgan ikki tomonlama uzatish mexanizmi aynan shu uzilishni bartaraf etib, uch darajani yagona hisoblash zanjiriga bog‘laydi va empirik koeffitsiyentlarga bog‘liqlikni kamaytiradi.

Modelning formal tavsifi standart notatsiyalarda berildi: IDEF0 funksional dekompozitsiyasi tizim funksiyalari va ularning boshqaruv-mexanizm oqimlarini, BPMN jarayon modeli esa algoritm mantig‘i va global iteratsiya siklini ifodaladi; mezodaraja natijasi uch o‘lchovli vizualizatsiya orqali tahlil qilindi. Bunday formalizatsiya modelning takrorlanuvchanligini oshiradi va uni dasturiy amalga oshirish uchun aniq spetsifikatsiya beradi.

Modelning asosiy cheklovi - uni aniq kon obyekti uchun sozlash ekspluatatsion aerologik ma’lumotlarni talab qiladi. Tadqiqot doirasida ko‘p fazali oqimlar, kondensatsiya va nostatsionar issiqlik jarayonlari ko‘rib chiqilmagan. RANS yondashuvi o‘rtachalashtirilgan oqim tavsifini beradi, shu sababli yuqori chastotali nostatsionar jarayonlarni aniqlash uchun LES yoki gibrid modellar talab etiladi.

XULOSA

Kon yo‘llarida havo oqimining aerodinamik parametrlarini aniqlashning uch darajali modeli ishlab chiqildi, unda tarmoq gidravlikasi, uch o‘lchovli hisoblash gidrodinamikasi va surrogat prognozlash darajalari ikki tomonlama parametrlar uzatish mexanizmi bilan bog‘langan. Modelning amaliy tatbiqi o‘n bir bosqichli hisoblash algoritmi ko‘rinishida rasmiylashtirildi. Nazariy ahamiyat tarmoq modelining empirik qarshilik koeffitsiyentiga bog‘liqligini kamaytirish yo‘lini asoslashdadir: uchastkaning ekvivalent qarshiligi uch o‘lchovli hisobdan ajratib olinadi va tarmoq modeliga qaytariladi. Chuqurlik omili - zichlikning barometrik va termik o‘zgarishi, tabiiy tortish va ventilyator xarakteristikasini keltirish - yagona izchil hisob zanjiriga birlashtirildi. Amaliy ahamiyat shamollatish tizimlarini loyihalashda namoyon bo‘ladi: algoritm energiya dissipatsiyasi eng yuqori bo‘lgan uchastkalarni maqsadli aniqlash va texnik yechimlarni aynan shu joylarga yo‘naltirish imkonini beradi. Solishtirma energiya sarfi ventilyatsiya rejimlarini miqdoriy taqqoslash mezoni sifatida taklif etildi. Iqtisodiy samara ventilyator qurilmalarining elektr iste’moli kamayishi va havo yo‘qotishlarining pasayishi hisobiga foydali sarf ulushining ortishidan shakllanadi. Kelgusidagi tadqiqotlar havo-

(cc) BY

depressiya suratga olish ma’lumotlari asosida modelni parametrlash va tekshirish, unga ko‘p fazali tashish va nostatsionar issiqlik almashinuvi qismlarini kiritish, hamda IoT sensorlari tarmog‘i bilan integratsiyalangan raqamli egizak konturini shakllantirish yo‘nalishlarida rejalashtiriladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Makhmudov A., Musurmanov E. Sh., Akhmedov S. T. Povyshenie effektivnosti provetrivaniya shakhty upravleniem potokom vozdukha [Improving the efficiency of mine ventilation by air flow control] // Universum: tekhnicheskie nauki. — 2023. — No. 9 (114). — DOI: 10.32743/UniTech.2023.114.9.16013.
2. Tsoy S., Ryazantsev G. K. Printsip minimuma i optimalnaya politika upravleniya ventilyatsionnymi i gidravlicheskimi setyami [The minimum principle and optimal control policy for ventilation and hydraulic networks]. — Alma-Ata: Nauka, 1968. — 257 p.
3. Kruglov Yu. V. Metody sovershenstvovaniya sovremennykh algoritmov rascheta statsionarnogo vozdukhoraspredeleniya v ventilyatsionnykh setyakh [Methods for improving modern algorithms for calculating stationary air distribution in ventilation networks] // Materialy ezhegodnoy nauchnoy sessii GI UrO RAN. — Perm, 2007.
4. Osintseva A. V., Kozyrev S. A. Obosnovanie effektivnykh variantov regulirovaniya ventilyatsii podzemnogo rudnika i optimizatsii parametrov regulyatorov posredstvom geneticheskogo algoritma [Justification of effective options for regulating underground mine ventilation and optimizing regulator parameters using a genetic algorithm] // Vestnik MGTU. — 2011. — Vol. 14, No. 3. — P. 530–534.
5. Kirin B. F., Dikolenko E. Ya., Ushakov K. Z. Aerologiya podzemnykh sooruzheniy (pri stroitelstve) [Aerology of underground structures (during construction)]. — Lipetsk: Lipetskoe izdatelstvo, 2000. — 456 p.
6. Mokhirev N. N. Provetrivanie podzemnykh gornodobyvayushchikh predpriyatiy [Ventilation of underground mining enterprises]. — Perm, 2001. — 280 p.
7. Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Obemnoe modelirovanie kak metod issledovaniya i upravleniya termo- i aerogazodinamicheskimi protsessami na gornykh predpriyatiyakh [Volumetric modeling as a method for studying and controlling thermo- and aerogasdynamic processes at mining enterprises] // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten. — 2013. — P. 149–156.
8. Yi H., Kim M., Lee D., Park J. Applications of computational fluid dynamics for mine ventilation in mineral development // Energies. — 2022. — Vol. 15, No. 22. — Art. 8405. — DOI: 10.3390/en15228405.
9. Vives J., Bascompta M., de Felipe J. J., Sanmiquel L. Computational fluid dynamics (CFD) study to optimize the auxiliary ventilation system in an underground mine // DYNA. — 2022. — Vol. 89, No. 221. — P. 84–91. — DOI: 10.15446/dyna.v89n221.100297.
10. Gendrue N., Liu S., Bhattacharyya S., Clister R. An investigation of airflow distributions with booster fan for a large opening mine through field study and CFD modeling // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2023. — Vol. 132. — Art. 104856. — DOI: 10.1016/j.tust.2022.104856.
11. Semin M., Kormshchikov D. Application of artificial intelligence in mine ventilation: a brief review // Frontiers in Artificial Intelligence. — 2024. — Vol. 7. — Art. 1402555. — DOI: 10.3389/frai.2024.1402555.
12. Tang W., Zhang Q., Li L., Chen R., Li H., Wang H., Liu X. Hybrid CNN-MLP architecture data-driven airflow parameters perception in underground metal mine // Expert Systems with Applications. — 2025. — Vol. 279. — Art. 127441. — DOI: 10.1016/j.eswa.2025.127441.
13. Karagianni M., Benardos A. Machine learning techniques to model and predict airflow requirements in underground mining // Materials Proceedings. — 2023. — Vol. 15, No. 1. — Art. 17. — DOI: 10.3390/materproc2023015017.
14. Yang X., Li H. Digital twin-driven deep learning prediction and adaptive control for coal mine ventilation systems // Scientific

(cc) BY *dtai.uz*

Reports. — 2025. — DOI: 10.1038/s41598-025-30513-4.
15. Halim A. Ventilation requirements for diesel equipment in underground mines — are we using the correct values? — Luleå: Luleå University of Technology, 2017. — 29 p.
16. Kalandarov I. Algorithm for the Problem of Loading Production Capacities in Production Systems // Beskopylny A., Shamtsyan M. (eds). XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 246. — Cham: Springer, 2022. — DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_99.
17. Kalandarov I. Development of Mathematical Models of Problems of Management the Production Division with a Discrete Unit Type Production // Shamtsyan M., Pasetti M., Beskopylny A. (eds). Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 247. — Singapore: Springer, 2022. — DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_52.
18. Kabulov A., Kalandarov I., Raxmatov D., Namozov N. Control System and Algorithm for Construction of Optimal Technological Routes for Machining Parts in the Machining Shop // Beskopylny A., Shamtsyan M., Artiukh V. (eds). XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 575. — Cham: Springer, 2023. — DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2_288.
19. Mislibayev I. T., Makhmudov A., Musurmanov E. Sh. Research and analysis of ventilation system and ventilation equipment of deep horizons of ore mines // Academic Research in Educational Sciences. — 2021. — Vol. 2, No. 12. — P. 446–450.
20. Mislibayev I. T., Musurmanov E. Sh. Application of an air curtain to improve airflow control in the air transmission shaft of the Guzhumsoy mine // Science and Innovative Development. — 2023. — Vol. 6, No. 5. — P. 23–32.

(cc) BY