© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.

UDK: 622.34:004.8

RUDALI FOYDALI QAZILMALARNI QAZIB OLISH JARAYONIDA YO‘QOTISHLARNI KAMAYTIRISHDA SUN’IY INTELLEKT TEXNOLOGIYALARIDAN FOYDALANISH

Serjanova Feriuza Iklasjan qizi
serjanovaferiuza3@gmail.com

Annotatsiya. Ruda yo‘qotilishi va rejasiz suyulishni kamaytirish yer osti hamda ochiq usuldagi konchilikda muhim muammolardan biridir, chunki loyihaviy va amaldagi qazib olish chegaralari o‘rtasidagi tafovutlar ajratib olinadigan metall miqdori, boyitish fabrikasiga beriladigan ruda sifati, ekspluatatsion xarajatlar va ishlab chiqarish prognozlarining ishonchliligiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Ushbu tadqiqot geotexnik va geologik ma’lumotlar, burg‘ilash-portlatish parametrlari, bo‘shliq yoki sirtni skanerlash, mashina ko‘rishi asosida ruda/jinsni tasniflash hamda raqamli egizakdan qayta aloqa ma’lumotlarini birlashtiruvchi ruda yo‘qotishlarini nazorat qilishning integratsiyalashgan sun’iy intellekt (SI) tizimini ishlab chiqadi. Metodik yangilik shundan iboratki, yopiq siklli arxitekturada mashinaviy o‘qitish modellari qazib olish birligi darajasida suyulish va ruda yo‘qotilishi xavfini prognoz qiladi, optimallashtirish qatlami esa ishlab chiqarish va barqarorlik cheklovlari doirasida qazib olish chegaralari, portlatish parametrlari, selektiv yuklash va yo‘naltirish qarorlarini moslashtiradi. Ushbu metodik tadqiqot uchun muayyan konning maxfiy ma’lumotlari mavjud bo‘lmagani sababli, xalqaro adabiyotlarda keltirilgan diapazonlar asosida 240 ta ishlab chiqarish birligidan iborat shaffof simulyatsion tekshiruv to‘plami yaratildi. Oddiy chiziqli regressiya, tasodifiy o‘rmon, gradient boosting va extra trees modellari ajratilgan test to‘plamida taqqoslandi. Suyulishni prognoz qilishda gradient boosting $R^2 = 0,822$ natijani, ruda yo‘qotilishini prognoz qilishda esa extra trees $R^2 = 0,838$ natijani ko‘rsatdi. Yopiq siklli boshqaruvning illustrativ ssenariysida o‘rtacha suyulish 11,04% dan 8,14% gacha, o‘rtacha ruda yo‘qotilishi esa 7,40% dan 5,51% gacha kamaydi; bu mos ravishda 26,2% va 25,6% nisbiy qisqarishga teng. Simulyatsion qazib olish koeffitsiyenti 92,60% dan 94,49% gacha oshdi, ruda sifati indeksi esa 4,76% ga yaxshilandi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, eng katta amaliy samara bitta SI algoritmidan emas, balki prognozlash, sensorli kuzatuv, optimallashtirish va reja-amal natijalarini solishtirishni yagona qaror qabul qilish sikliga birlashtirishdan olinadi. Taklif etilgan yondashuv mahalliy ma’lumotlar sifati, geotexnik cheklovlar, model driftlari va inson nazorati aniq boshqarilgan taqdirda, muayyan kon uchun pilot joriy etishning metodik asosi bo‘lishi mumkin.

Kalit so‘zlar: sun’iy intellekt; ruda yo‘qotilishi; suyulish; mashinaviy o‘qitish; raqamli egizak; rudani saralash; burg‘ilash va portlatish; konchilikni optimallashtirish.

KIRISH

Konchilik samaradorligi faqat maydalangan va tashilgan tog‘ jinsining nominal hajmi bilan emas, balki qimmatli minerallashgan materialning bo‘sh jinsdan qanchalik aniq ajratilishi va ishlab chiqarish zanjiri bo‘ylab to‘g‘ri yo‘naltirilishi bilan ham belgilanadi. Ikki ko‘rsatkich ayniqsa muhim: iqtisodiy qiymatga ega ruda qazib olinmay qolishi yoki chiqindiga noto‘g‘ri yo‘naltirilishini ifodalovchi ruda yo‘qotilishi hamda ruda oqimiga chiqindi yoki iqtisodiy jihatdan samarasiz materialning rejasiz aralashib ketishini ifodalovchi suyulish. Har ikkala holat ham ajratib olinadigan metall miqdorini kamaytiradi va “kondan fabrikagacha” samaradorlik ko‘rsatkichlarini buzadi. Yer osti kamerali qazib olishda ular ortiqcha o‘yilish va yetarli qazilmaslik, kamera geometriyasi, tog‘ massivi sifati, burg‘ilash og‘ishi va portlatish aniqligi bilan kuchli bog‘liq; ochiq konlarda esa qo‘shimcha ravishda sifat nazorati noaniqligi, qazib olish chegaralarini belgilash, selektiv yuklash, ruda/jinsni aniqlash va tashish marshrutiga bog‘liq. Shu sababli xalqaro tadqiqotlarda yo‘qotish va

© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.

suyulish doimiy reja koeffitsiyentlari sifatida emas, balki katta hajmdagi ma'lumotga asoslangan, nolinear qaror qabul qilish muammosi sifatida tobora ko'proq ko'rilmoqda (1-4).

Yo'qotishlarni nazorat qilishning an'anaviy amaliyoti empirik barqarorlik diagrammalari, o'rtacha suyulish koeffitsiyentlari, qo'lda tuziladigan sifat nazorati poligonlari, portlatishdan keyingi vizual tekshiruv hamda ishlab chiqarish hodisasidan so'ng reja va amaldagi natijalarni solishtirishga tayanadi. Bu usullar tushunarli va nisbatan arzonligi sababli o'z ahamiyatini saqlab qoladi, biroq geologik o'zgaruvchanlik, portlatish, geometriya va operatsion qarorlar o'rtasidagi bog'lanishlar kuchli nolinear tus olganda imkoniyatlari cheklanadi. Jang, Topal va Kawamura bir nechta sababiy omillar asosida kamerali qazib olishda notekis buzilishni prognoz qiluvchi neyro-fuzzy tizimni taklif qilgan bo'lsa, Zhao va Niu orqaga tarqalish algoritmiga asoslangan neyron tarmoq rejasiz suyulishni an'anaviy empirik yondashuvlarga nisbatan aniqroq miqdoriy prognoz qilishi mumkinligini ko'rsatgan (4, 5). Keyingi tadqiqotlar ham sun'iy neyron tarmoqlar, daraxt ansambllari, genetik dasturlash va stacking modellar kamera geometriyasi, tog' jinslari sifati va ekspluatatsion o'zgaruvchilar kombinatsiyasidan bitta empirik tenglama bilan ifodalash qiyin bo'lgan prognoz signallarini ajrata olishini tasdiqlaydi (6, 8-10).

Kon ma'lumotlarining tobora ko'payib borishi muammoning mohiyatini o'zgartirmoqda. Zamonaviy konlarda LiDAR, fotogrammetriya va bo'shliqni monitoring qilish tizimlari yordamida kamera yoki pog'ona sirtining uch o'lchamli modeli olinadi; burg'ilash uskunalari quduq koordinatalari, og'ishi va burg'ilash tezligi jurnallarini yaratadi; portlatish tizimlari zaryad va kechikish vaqtlarini qayd etadi; ekskavatorlar hamda avtosamosvallar yuk massasi va marshrut ma'lumotlarini shakllantiradi; optik, rentgen, yaqin infraqizil yoki giperspektral sensorlar ruda va bo'sh jinsni farqlashi mumkin. Tizimli sharhlar konchilikda mashinaviy o'qitish qidiruv, qazib olish va rekultivatsiya bosqichlarida tez sur'atlarda kengayayotganini, chuqur o'qitish esa tasvirlar, nuqta bulutlari va texnologik monitoringda tobora ko'proq qo'llanayotganini ko'rsatadi (1, 2). Sensorli saralash va kompyuter ko'rishi, agar o'lchanayotgan xususiyat mineralning iqtisodiy qiymati bilan yetarli darajada bog'langan bo'lsa, qayta ishlash bosqichiga kiradigan chiqindi miqdorini kamaytirishi mumkin (11-13).

Biroq texnologik imkoniyat kon muhandisini shunchaki prognoz modeli bilan almashtirishdan iborat emas. Kamera yoki pog'onada yuqori suyulish ehtimoli borligini ko'rsatuvchi prognoz faqat operatsiya qazib olishdan oldin yoki jarayon davomida unga javob bera olsa, real qiymat yaratadi. Shu sababli raqamli egizak arxitekturasi muhim: u jismoniy kon jarayonini virtual model bilan bog'lab, ssenariylarni tekshirish, cheklovlarni nazorat qilish va yangi kuzatuvlar kelishi bilan qarorlarni yangilash imkonini beradi (3). Xuddi shuningdek, ochiq kon transportini boshqarishda reinforcement learning usullari noaniqlik sharoitida hajm va sifat maqsadlariga rioya qilgan holda real vaqt rejimida operatsion qarorlar qabul qilishi mumkinligini ko'rsatmoqda (14). Portlatish bo'yicha izohlanadigan mashinaviy o'qitish tadqiqotlari ham bashorat aniqligini saqlagan holda fizik parametrlar ta'sirini muhandislar uchun tushunarliroq ko'rsatishga e'tibor kuchayayotganini tasdiqlaydi (15).

Ushbu tadqiqotning maqsadi rudali foydali qazilmalarni qazib olishda ruda yo'qotishlarini kamaytirish uchun integratsiyalashgan SI tizimini ishlab chiqish va baholashdan iborat. Tadqiqotning to'rtta vazifasi belgilandi: (i) SI ruda yo'qotilishi va suyulishni qanday mexanizmlar orqali kamaytirishini tizimlashtirish; (ii) geologik, geotexnik, burg'ilash-portlatish, sensorli va ishlab chiqarish ma'lumotlarini bog'lovchi ko'p manbali ma'lumotlar arxitekturasini aniqlash; (iii) takror ishlab chiqish mumkin bo'lgan simulyatsion misolda bir nechta prognoz algoritmlarini taqqoslash; (iv) yopiq siklli SI-yordamidagi boshqaruvning ehtimoliy operatsion samarasini miqdoriy baholash. Ilmiy yangilik yo'qotishlarni kamaytirishni alohida prognoz masalasi emas, balki xavfni prognoz qilish,

© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.

optimallashtirish, bajarish va natijalarni solishtirishni bog‘laydigan uzluksiz “kondan fabrikagacha” qaror qabul qilish sikli sifatida qarashdan iborat.

Asosiy qism

Yo‘qotish ko‘rsatkichlari va qaror maqsadini aniqlash

Kamera, panel yoki selektiv qazib olish bloki kabi alohida qazib olish birligi uchun ruda yo‘qotilishi iqtisodiy jihatdan qazib olinishi mumkin bo‘lgan rudaning belgilangan ruda oqimiga kelib tushmagan qismi sifatida ifodalanishi mumkin. M_res — ekspluatatsion loyiha bo‘yicha yer qa’rida aniqlangan qazib olinadigan ruda massasi, M_rec esa qazish va solishtirma nazoratdan keyin amalda olingan ruda-ekvivalent massa bo‘lsin. Konchilik yo‘qotishi L quyidagicha aniqlanadi:

$$L = ((M_res - M_rec) / M_res) \times 100\% \quad (1)$$

Suyulish D — ruda oqimiga chiqindi yoki iqtisodiy jihatdan past qiymatli materialning kirib kelishini ifodalaydi. Agar M_w rejasiz ravishda M_o tonna maqsadli rudaga aralashgan chiqindi massasi bo‘lsa, suyulish quyidagicha aniqlanadi:

$$D = (M_w / (M_o + M_w)) \times 100\% \quad (2)$$

Amaliy SI boshqaruvchisi ushbu ko‘rsatkichlardan birortasini alohida minimallashtirmasligi kerak. Chunki haddan tashqari konservativ qazib olish suyulishni kamaytirib, ruda yo‘qotilishini oshirishi mumkin; aksincha, agressiv qazib olish chiqindi aralashuvi hisobiga qazib olish koeffitsiyentini oshirishi mumkin. Shu sababli optimallashtirish qatlami prognoz qilingan ruda yo‘qotilishi, prognoz qilingan suyulish, maqsadli ruda sifatidan og‘ish va normallashtirilgan ekspluatatsion xarajatni muvozanatlashtiruvchi ko‘p mezonli maqsad funksiyasidan foydalanadi. Soddalashtirilgan ko‘rinishda:

$$J = w_1\hat{L} + w_2\hat{D} + w_3|G_feed - G_target|/G_target + w_4C_norm \quad (3)$$

bu yerda $\hat{L}$ va $\hat{D}$ — SI tomonidan prognoz qilingan yo‘qotish va suyulish; G_feed — yetkazib beriladigan ruda sifatining prognoz qiymati; G_target — qayta ishlash uchun maqsadli sifat; C_norm — normallashtirilgan xarajat ko‘rsatkichi; w_1-w_4 esa kon boshqaruvi belgilaydigan vazn koeffitsiyentlaridir. Optimallashtirish geotexnik barqarorlik, minimal qazib olish qalinligi, uskunalar kirish imkoniyati, ishlab chiqarish hajmi, aralashtirish va xavfsizlik cheklovlari ostida bajariladi. Mazkur ifoda konni loyihalash va qazib olish amaliyotining asosiy xususiyati bo‘lgan qazib olish koeffitsiyenti va suyulish o‘rtasidagi muvozanatni bevosita hisobga oladi (4, 8, 9).

Integratsiyalashgan ma’lumotlar arxitekturasi

Taklif etilayotgan arxitektura besh guruh ma’lumotlardan foydalanadi. Birinchi guruh — rudali tana geometriyasi, ruda sifati, noaniqlik va ruda/jins sinfini taqdim etuvchi geologik resurs hamda sifat nazorati modeli. Ikkinchi guruh geotexnik va kamera yoki pog‘ona geometriyasiga oid ko‘rsatkichlarni: modifikatsiyalangan barqarorlik soni, gidravlik radius, yotish burchagi va mahalliy strukturaviy indikatorlarni qamrab oladi. Uchinchi guruh quduq og‘ishi, qarshilik chizig‘i, quduqlar oralig‘i, portlovchi modda sarfi, kechikish va maydalanganlik kabi burg‘ilash-portlatish ma’lumotlaridan iborat. To‘rtinchi guruh bo‘shliq monitoringi, LiDAR, UAV fotogrammetriyasi, ekskavator kamerasi, konveyer tasvirlari va sensorli ruda saralashidan keladigan real vaqtga yaqin kuzatuvlardir. Beshinchi guruh amaldagi tonnaj, yo‘naltirilgan manzil, fabrikaga berilgan ruda sifati hamda amaldagi kamera yoki qazish yuzasi kabi ishlab chiqarish natijalarini o‘z ichiga oladi. “Aqlli konchilik” va raqamli egizaklar bo‘yicha sharhlar bunday ko‘p manbali integratsiyani alohida prognoz vositalaridan operatsion qarorlarni qo‘llab-quvvatlash tizimiga o‘tishning zarur sharti sifatida ko‘rsatadi (1-3).

© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.

1-jadval. SI yordamida yo‘qotishlarni nazorat qilishda ma’lumot manbalari va ularning roli

Ma’lumotlar guruhi	Asosiy o‘zgaruvchilar	SI vazifasi	Yo‘qotishni kamaytirish chorasi
Geologiya / sifat nazorati	Blok sifati, ruda/jins sinfi, chegara noaniqligi, rudali tana qalinligi	Sifatni prognozlash; chegara xavfini tasniflash	Moslashuvchan qazish chegaralari; selektiv qazib olish
Geotexnika / geometriya	N′, RQD/Q, gidravlik radius, yotish burchagi, oraliq, kamera o‘lchamlari	Suyulish va beqarorlik xavfini prognozlash	Kamerani qayta loyihalash; ketma-ketlik; mustahkamlash va ochiq turish vaqtini nazorat qilish
Burg‘ilash va portlatish	Quduq og‘ishi, qarshilik chizig‘i, quduqlar oralig‘i, portlovchi modda sarfi, kechikish, maydalanganlik	Ortiqcha/yetarli bo‘lmagan o‘yilish va maydalanganlikni prognozlash	Portlatish parametrlarini optimallashtirish; kontur bo‘yicha oldindan portlatish; zaryad nazorati
Skanerlash / mashina ko‘rishi	CMS/LiDAR nuqta bulutlari, UAV sirtlari, RGB/giperspektral/XRT tasvirlar	Amaldagi va loyihaviy holatni segmentatsiya qilish; ruda/jinsni aniqlash	Chegarani real vaqtda tuzatish; saralash; noto‘g‘ri tasnifni oldini olish
Ishlab chiqarish / dispetcherlik	Yuk massasi, manzil, sikl vaqti, ruda sifati, ombor balansi	Marshrutlash, aralashtirish va anomaliyani aniqlash	Rudani chiqindiga noto‘g‘ri yuborishni oldini olish; fabrikaga beriladigan oqimni barqarorlashtirish
Qayta aloqa / solishtirma nazorat	Amalda qazilgan hajm, olingan tonna, sifat, qazib olish koeffitsiyenti, suyulish	Model driftini kuzatish va qayta o‘qitish	Uzluksiz takomillashtirish va mahalliy kalibrlash

Prognoz modellari va boshqaruv mantiqi

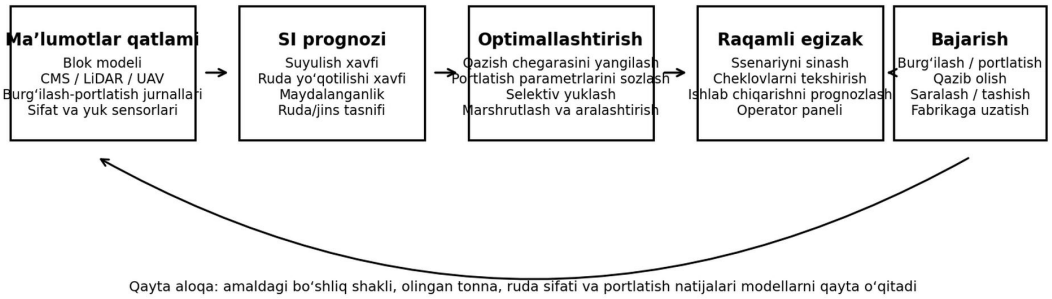
Ikki uzluksiz maqsad ko‘rsatkich ko‘rib chiqildi: rejasiz suyulish foizi va ruda yo‘qotilishi foizi. To‘rtta regressiya oilasi taqqoslandi: tushunarli boshlang‘ich model sifatida oddiy chiziqli regressiya, tasodifiy o‘rmon (random forest), gradient boosting va o‘ta tasodifiy daraxtlar (extra trees). Ansambl modellari nolinear bog‘lanishlar, chegaraviy effektlar va omillar ahamiyatining bir jinsli bo‘lmagan taqsimotini kuchli parametrik farazlarsiz ifodalay olishi sababli tanlandi. Oldingi konchilik tadqiqotlarida suyulish, kamera barqarorligi va portlatishni prognoz qilish uchun shunga o‘xshash daraxtga asoslangan va neyron yondashuvlar qo‘llangan (5-10).

Prognoz qatlami passiv hisobot sifatida emas, balki boshqaruv mantiqiga biriktirilgan holda ishlaydi. Prognoz qilingan suyulish operatsion chegaradan oshganda, boshqaruvchi faol qazib olish chegarasini qisqartirish, portlatish loyihasini o‘zgartirish, ochiq holatda turish vaqtini kamaytirish, yuklash ketma-ketligini almashtirish yoki selektiv sensor nazoratini kuchaytirish kabi choralarni ustuvorlashtiradi. Prognoz qilingan ruda yo‘qotilishi haddan tashqari oshsa, tizim kamroq konservativ qazib olish chegarasi, maqsadli ikkilamchi qazib olish yoki ruda/jins tasnifini qayta ko‘rib chiqishni sinovdan o‘tkazadi. Materialni tashish bosqichida tasnif ishonchliligi va sifat prognozlari marshrut qoidalari bilan birlashtirilib, noaniq materialni qaytarib bo‘lmaydigan tarzda chiqindiga yoki fabrikaga yuborish o‘rniga tekshiruv omboriga yo‘naltirish mumkin. Sensorli ruda saralash bo‘yicha

© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.

tadqiqotlar tanlangan sensor texnologiyasi mineralogik yoki fizik kontrastga javob bera olganda tezkor material tasnifi amalda mumkinligini ko‘rsatadi (11-13).

Raqamli egizak qatlami bajarilishidan oldin nomzod qarorni qabul qilib, uning qazib olish hajmi, ruda sifati, uskunalar talabi va cheklovlarga kutilayotgan ta’sirini hisoblaydi. Asosiy muhandislik tamoyili shundan iboratki, SI tavsiyalari maslahat xarakterida yoki qat’iy cheklovlar doirasida qoladi. Statistik model ijobiy iqtisodiy natija prognoz qilgan taqdirda ham geotexnik xavfsizlik chegaralari, minimal amaliy qazib olish qalinligi va normativ talablar bekor qilinmaydi. “Inson-konturda” tamoyili muhim, chunki konchilik ma’lumotlari odatda muayyan kon maydoniga xos, asosiy SI sohalaridagi ma’lumotlar to‘plamlariga nisbatan kichik va geologiya hamda ish usullari o‘zgarganda taqsimot siljishiga moyil bo‘ladi (2, 3).



Yo‘qotish va suyulishni nazorat qilish uchun yopiq siklli SI arxitekturasi

1-rasm. Ruda yo‘qotilishi va suyulishni kamaytirish uchun SI yordamidagi yopiq siklli arxitektura.

Simulyatsion tekshiruv ma’lumotlar to‘plami va baholash tartibi

Mazkur tadqiqot uchun hech qanday maxfiy kon ma’lumotlari taqdim etilmagan. O‘ylab topilgan dala kuzatuvlarini empirik dalil sifatida ko‘rsatmaslik maqsadida modelni tekshirish faqat taklif etilgan ish jarayonining xulqini namoyish etishga mo‘ljallangan, takror yaratish mumkin bo‘lgan sintetik ma’lumotlar to‘plamida bajarildi. To‘plam 240 ta shartli ishlab chiqarish birligidan iborat bo‘ldi. Kirish diapazonlari keltirilgan suyulish va kamera barqarorligi adabiyotlarida ko‘p uchraydigan qiymatlarga yaqin qilib tanlandi: modifikatsiyalangan barqarorlik soni N′ = 1-65, gidravlik radius = 1-14, kamera yoki rudali tananing yotish burchagi = 42-90°, burg‘ilash qudug‘i og‘ishi = 0,1-1,5 m, portlovchi modda sarfi = 0,35-1,35, rudali tana qalinligi = 1,5-9,5 m hamda o‘lchovsiz geologik chegara noaniqligi = 0,02-0,90. Ssenariy hisoblari uchun boshlang‘ich ruda sifati va maydalanganlik indikatorlari ham generatsiya qilindi.

Sintetik maqsad funksiyalariga gidravlik radius, barqarorlik soni, yotish burchagi, quduq og‘ishi, portlovchi modda sarfi, rudali tana qalinligi va chegara noaniqligi o‘rtasidagi nolinear o‘zaro ta’sirlar kiritildi. O‘lchanmagan operatsion o‘zgaruvchanlikni ifodalash uchun tasodifiy shovqin qo‘shildi. Natijada boshlang‘ich o‘rtacha suyulish 11,04%, o‘rtacha ruda yo‘qotilishi esa 7,40% bo‘ldi. Ushbu qiymatlar haqiqiy kondan olingan o‘lchovlar emas va universal me’yor sifatida talqin qilinmasligi kerak. Ular faqat algoritmlarni taqqoslash va boshqaruv konsepsiyasini baholash uchun illustrativ sinov maydoni vazifasini bajaradi.

© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.

Har bir maqsad uchun ma'lumotlarning 80% qismi modelni o'qitishga, 20% qismi esa qat'iy belgilangan random seed yordamida test qilish uchun ajratildi. Samaradorlik determinatsiya koeffitsiyenti (R^2), o'rtacha mutlaq xatolik (MAE) va o'rtacha kvadratik xatolikning kvadrat ildizi (RMSE) bilan baholandi. Yakuniy testdan oldin giperparametrlar qat'iy belgilandi, bu sodda va takrorlanadigan taqqoslashni saqlab qoldi. Tahlilning ikkinchi qismida maqsadli portlatish tuzatishlari, moslashuvchan qazib olish chegaralari va selektiv yuklashning oldini olish mumkin bo'lgan yo'qotish tarkibiy qismlariga birgalikdagi ta'sirini ifodalovchi illustrativ boshqaruv transformatsiyasi qo'llandi. Transformatsiya natijalar haqiqiy dala sharoitida isbotlangan samara sifatida emas, balki tizimning ehtimoliy xulqini ko'rsatishi uchun ataylab chegaralandi.

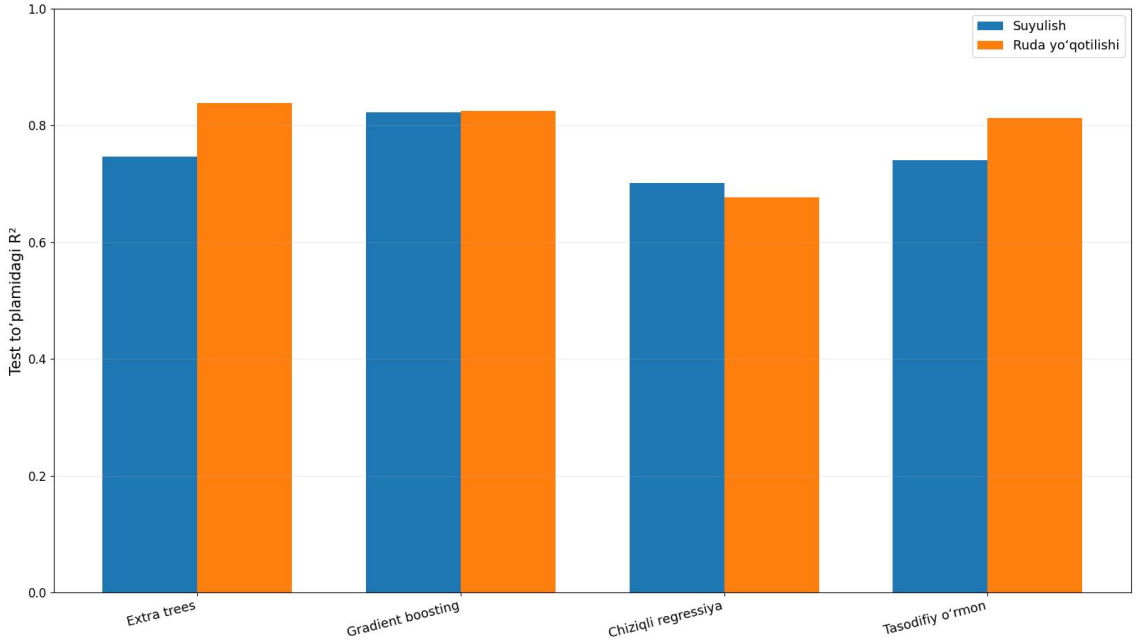
Prognozlash samaradorligi

Modellarni taqqoslash simulyatsiya qilingan yo'qotish mexanizmlarida chiziqli boshlang'ich model to'liq qamrab ololmaydigan nolinear tuzilma mavjudligini tasdiqladi. Suyulish uchun gradient boosting ajratilgan test to'plamida eng yaxshi natijani ko'rsatdi: $R^2 = 0{,}822$, MAE = 0,781 foiz punkt va RMSE = 0,957 foiz punkt. Ruda yo'qotilishi uchun extra trees eng yuqori $R^2 = 0{,}838$ natijaga, shuningdek eng past MAE va RMSE qiymatlariga (mos ravishda 0,478 va 0,582 foiz punkt) erishdi; gradient boosting ham yaqin natija ko'rsatdi ($R^2 = 0{,}825$). Bu natija "kondan fabrikagacha" zanjirning barcha bosqichlarini bitta algoritm bilan boshqarishga urinish o'rniga, turli yo'qotish mexanizmlari uchun turli modellarni tanlash mumkin bo'lgan amaliy arxitekturani qo'llab-quvvatlaydi.

2-jadval. Simulyatsion misolda prognoz modellarining test to'plamidagi samaradorligi

Maqsad	Model	R^2	MAE	RMSE
Suyulish	Chiziqli regressiya	0.701	0.957	1.240
Suyulish	Tasodifiy o'rmon	0.740	0.917	1.156
Suyulish	Gradient boosting	0.822	0.781	0.957
Suyulish	Extra trees	0.747	0.902	1.141
Ruda yo'qotilishi	Chiziqli regressiya	0.677	0.683	0.821
Ruda yo'qotilishi	Tasodifiy o'rmon	0.813	0.508	0.625
Ruda yo'qotilishi	Gradient boosting	0.825	0.508	0.605
Ruda yo'qotilishi	Extra trees	0.838	0.478	0.582

© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.



2-rasm. Ajratilgan test to‘plamida suyulish va ruda yo‘qotilishi prognozlari uchun R^2 qiymatlari.

Ikki maqsad bo‘yicha algoritmlar reytingining turlicha chiqishi operatsion nuqtai nazardan mazmunlidir. Suyulish gidravlik radius bilan bog‘liq chegaraviy effektlar va portlatishdagi nolinear o‘zaro ta’sirlar bilan generatsiya qilingan bo‘lib, gradient boosting ularni samarali aniqladi. Ruda yo‘qotilishi esa chegara noaniqligi, tor rudali tana sharoiti va maydalanganlik bilan bog‘liq bir nechta lokal o‘zaro ta’sir rejimlarini o‘z ichiga olgan; tasodifiy daraxtlar ansambli ushbu bo‘linmalarni biroz yaxshiroq aks ettirdi. Amaliy joriy etishda yakuniy model bitta tasodifiy bo‘linishga emas, balki kon uchastkalari bo‘yicha vaqtli yoki fazoviy validatsiyaga asoslanib tanlanishi kerak, chunki qo‘shni kameralar yoki pog‘onalar bir xil geologik sharoitlarni ulashishi va mustaqil namuna farazini buzishi mumkin.

SI yordamidagi yopiq siklli boshqaruv samarasi

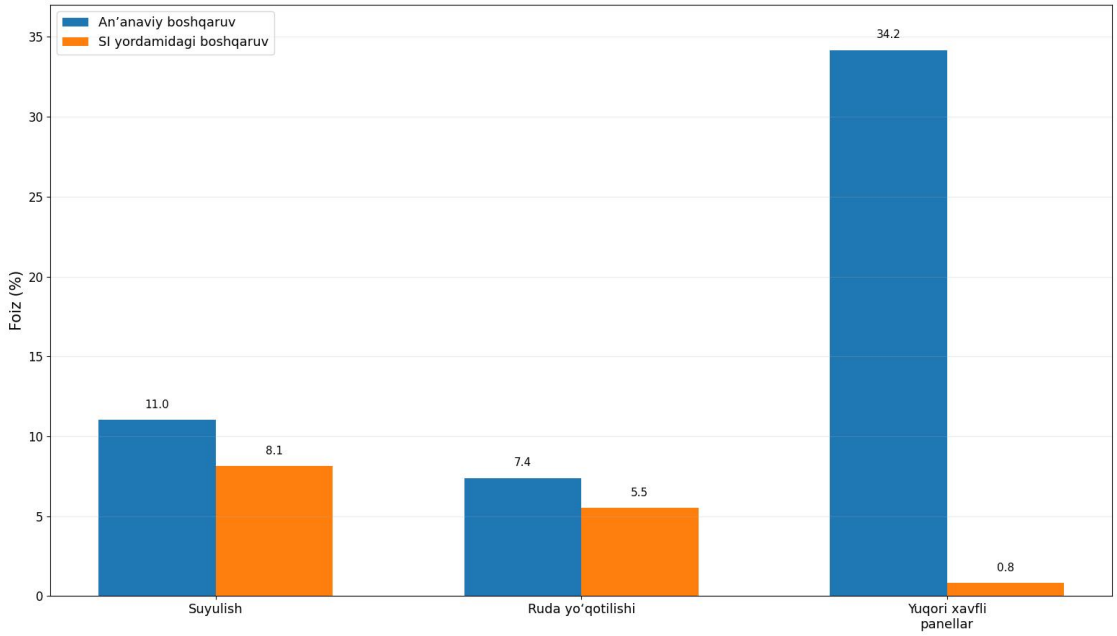
Illustrativ yopiq siklli ssenariy ikkala asosiy yo‘qotish ko‘rsatkichini bir vaqtning o‘zida kamaytirdi. O‘rtacha suyulish 11,04% dan 8,14% gacha tushdi, ya’ni nisbiy kamayish 26,2% ni tashkil etdi. O‘rtacha ruda yo‘qotilishi 7,40% dan 5,51% gacha kamayib, nisbiy qisqarish 25,6% bo‘ldi. Soddalashtirilgan massa balansi modelida ruda yo‘qotilishi qazib olish koeffitsiyentining komplementi hisoblangani sababli, simulyatsion qazib olish koeffitsiyenti 92,60% dan 94,49% gacha oshdi, bu 1,90 foiz punkt yaxshilanishga teng. Ruda sifati indeksi 1,261% dan 1,321% gacha, ya’ni 4,76% ga oshdi, chunki ruda oqimiga kamroq chiqindi tushdi va qaytarib olinadigan zaxiradan kamroq ruda yo‘qotildi.

3-jadval. Illustrativ boshqaruv ssenariysida an’anaviy va SI yordamidagi natijalar

Ko‘rsatkich	An’anaviy	SI yordamida	O‘zgarish
Suyulish (%)	11.04	8.14	-2.90 (-26.2%)
Ruda yo‘qotilishi (%)	7.40	5.51	-1.90 (-25.6%)
Qazib olish koeffitsiyenti (%)	92.60	94.49	+1.90 (+2.0%)
Ruda sifati indeksi (%)	1.26	1.32	+0.06 (+4.8%)

© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.

Ko‘rsatkich	An’anaviy	SI yordamida	O‘zgarish
Yuqori xavfli panellar: suyulish >12% (%)	34.17	0.83	-33.33 (-97.6%)



3-rasm. Illustrativ SI-yordamidagi boshqaruvdan oldingi va keyingi yo‘qotish ko‘rsatkichlari.

Ayniqsa muhim natija suyulish taqsimotining yuqori xavfli “dum” qismidagi o‘zgarish bo‘ldi. An’anaviy ssenariyda simulyatsiya qilingan ishlab chiqarish birliklarining 34,2% ida suyulish 12% dan oshgan. Maqsadli boshqaruvdan keyin bu chegaradan faqat 0,8% birlik oshdi. Bu xavfga asoslangan aralashuv nega o‘rtacha ko‘rsatkichning kichik yaxshilanishidan ko‘ra qimmatroq bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatadi: kon ortiqcha o‘yilish, noto‘g‘ri tasniflash yoki xato yo‘naltirishning oz sonli, ammo og‘ir holatlarini oldini olish orqali katta iqtisodiy samara olishi mumkin. Shu sababli boshqaruv konsepsiyasi har bir birlikka bir xil qimmat nazorat intensivligini qo‘llash o‘rniga yuqori xavfli birliklarni qo‘shimcha sensor nazorati, muhandislik ko‘rigi va moslashuvchan portlatish yoki qazib olish qarorlari uchun ustuvorlashtiradi.

Olingan natijalar konchilik bo‘yicha zamonaviy tadqiqotlar yo‘nalishiga mos keladi. Ruda yo‘qotilishi va suyulishni prognoz qilish bo‘yicha dastlabki ishlar bir nechta o‘zaro bog‘liq sababiy omillar mavjud bo‘lganda yumshoq hisoblash (soft-computing) usullari oddiy tarixiy yoki empirik baholashdan ustun kelishi mumkinligini ko‘rsatgan (4, 5). Keyingi tadqiqotlar bitta neyron tarmoqdan gibrid modellar, gen ifodasi dasturlashi va ansambl o‘qitishga o‘tdi hamda butun kon uchun bitta o‘rtacha suyulish koeffitsiyenti o‘rniga kamera darajasidagi prognozga e’tibor qaratdi (8-10). Ushbu ish mazkur mantiqni yana bir bosqichga kengaytiradi: prognoz qilingan xavf tahlilning yakuniy mahsuloti emas, balki operatsion optimallashtirish uchun kirish ma’lumoti sifatida ishlatiladi.

Texnik nuqtai nazardan yo‘qotishlarni kamaytirish bilan eng bevosita bog‘liq bo‘lgan to‘rtta SI yo‘nalishi mavjud. Birinchisi — geotexnik va geometrik xavfni prognoz qilish. Modifikatsiyalangan barqarorlik soni, gidravlik radius, yotish burchagi va kamera geometriyasi barqarorlik hamda suyulishga ta’sir qiluvchi muhim o‘zgaruvchilar sifatida qayta-qayta qayd etiladi; mashinaviy o‘qitish modellari ularni burg‘ilash-portlatish ma’lumotlari bilan birlashtirib, har bir qazib olish birligi uchun individual xavf bahosini berishi mumkin (5, 6, 8, 9). Bu muhandislarga ishlab chiqarishdan oldin yuqori xavfli kamerani aniqlash va geometriya, ketma-ketlik, mustahkamlash, ochiq turish vaqti yoki

© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.

portlatish loyihasini o‘zgartirish imkonini beradi. Afzallik profilaktik xususiyatga ega: tizim ortiqcha o‘yilish yoki yetarli qazilmaslikni keyin hisoblash emas, balki oldindan bartaraf etishga intiladi.

Ikkinchi yo‘nalish — portlatishni optimallashtirish. Portlatish qazish chegarasining shikastlanishi, orqa tomonda ortiqcha buzilish (backbreak) va maydalanganlikning o‘zgaruvchanligiga kuchli ta’sir qiladi. Sharhlar mashinaviy o‘qitish va gibrid modellar yer tebranishi, uchuvchi jins bo‘laklari, maydalanganlik va backbreakni prognoz qilishda tobora muvaffaqiyatli qo‘llanayotganini ko‘rsatadi, ayniqsa boshqariladigan portlatish parametrlarini geotexnik ma’lumotlar bilan birlashtirganda (7). Izohlanadigan simvolik regressiya usullari ayniqsa istiqbolli, chunki ular nolinear munosabatni muhandis ko‘rib chiqishi va fizik mantiqqa mosligini tekshirishi mumkin bo‘lgan ko‘rinishda ifodalaydi (15). Yo‘qotishlarni kamaytirishda maqsad faqat ideal bo‘lak o‘lchamiga erishish emas; balki zarur maydalanganlikni ta’minlab, bir vaqtning o‘zida qazish chegarasi shikastlanishini kamaytiradigan va loyihaviy ruda konturini saqlaydigan portlatish konfiguratsiyasini topishdir.

Uchinchi yo‘nalish — ruda/bo‘sh jinsni aniqlash. Sensorli saralash bo‘yicha adabiyotlar XRT, XRF, yaqin infraqizil, optik va boshqa sensor tizimlari aniqlanadigan fizik yoki mineralogik kontrast mavjud bo‘lganda mayda maydalashdan oldin chiqindini ajratib tashlashi mumkinligini ko‘rsatadi (11, 12). Shatwell, Murray va Barton rang hamda tekstura xususiyatlarini mashinaviy o‘qitish bilan birlashtirib, ularning sinov sharoitida oltin va kumush saqlovchi jinslarni real vaqt rejimida Matthews korrelyatsiya koeffitsiyenti 0,961 va 44 ms dan kam qayta ishlash vaqti bilan tasniflaganini ko‘rsatdi (13). Konchilik yo‘qotishlari nuqtai nazaridan ayni tamoyil zaboy, ekskavator, konveyer yoki saralash qurilmasida noto‘g‘ri tasniflashni kamaytirish va noaniq material uchun tekshiruv yo‘lini yaratish uchun qo‘llanishi mumkin. Biroq sensor tanlovi kon yotqizig‘iga xos bo‘lishi kerak, chunki tashqi ko‘rinish har doim ham iqtisodiy mineralizatsiya bilan to‘g‘ridan-to‘g‘ri bog‘liq emas.

To‘rtinchi yo‘nalish — tizim darajasidagi optimallashtirish. Kon material sinfini to‘g‘ri aniqlashi mumkin, biroq yuk noto‘g‘ri manzilga yuborilsa, ombordagi aralashtirish ruda sifati o‘zgarishini yashirsa yoki transport dispetcherligi rejani bajarishga to‘sqinlik qilsa, baribir iqtisodiy qiymat yo‘qotiladi. Ochiq kon avtosamosvallari dispetcherligi bo‘yicha reinforcement learning tadqiqotlari SI agentlari stoxastik sharoitda hajm va sifat maqsadlariga intilgan holda real vaqt topshiriq qarorlarini qabul qila olishini ko‘rsatadi (14). Raqamli egizaklar esa ushbu qarorlarni burg‘ilash, yuklash, tashish va qayta ishlash cheklovlari bilan birgalikda simulyatsiya qilish imkonini beradigan yanada kengroq arxitekturani taqdim etadi (3). Demak, SI asosida yo‘qotishlarni kamaytirishning eng rivojlangan ko‘rinishi rudali tana haqidagi bilimni qazib olish va materialni qayerga yuborish qarorlari bilan bog‘laydigan integratsiyalashgan tizimdir.

Ushbu maqolada keltirilgan simulyatsion yaxshilanishlar ehtiyotkorlik bilan talqin qilinishi kerak. Yo‘qotish ko‘rsatkichlarining 25-26% nisbiy kamayishi muayyan kon uchun prognoz emas. Haqiqiy samara yo‘qotishning qaysi qismi operatsion jihatdan oldini olish mumkinligiga, sensor kuzatuvining aniqligi va tezkorligiga, uskunalar hamda muhandislarning model tavsiyalarini bajara olishiga va aralashuvning iqtisodiy qiymatiga bog‘liq. Reja-amal solishtirma nazorati allaqachon yuqori darajada yo‘lga qo‘yilgan konda foiz jihatdan kichikroq yaxshilanish kuzatilishi mumkin, biroq metall qiymati bo‘yicha natija baribir sezilarli bo‘lishi ehtimol; beqaror tog‘ massivi mavjud konda esa xavfsizlik va geotexnik cheklovlar SI tavsiyalaridan ustun turadi. Simulyatsiyaning vazifasi integratsiyalashgan metodikani dala joriy etishidan oldin qanday tekshirish mumkinligini ko‘rsatishdir.

Ma’lumotlarni boshqarish ham muhim cheklov hisoblanadi. Konchilik ma’lumotlarida bo‘sh intervallar, nomlash standartlarining o‘zgarishi, sensor driftlari, koordinata tizimlarining mos kelmasligi va kuchli fazoviy bog‘liqlik tez-tez uchraydi. Chuqur o‘qitish bo‘yicha sharhlar yirik, ochiq va xilma-xil kon ma’lumotlar to‘plamlari yetishmasligini hamda geologiyasi, uskunasi va ish usuli turlicha bo‘lgan konlar o‘rtasida modelni umumlashtirish qiyinligini qayd etadi (2). Shu sababli ishlab chiqarish tizimi har bir prognoz uchun model versiyasi, ma’lumot manbasi, noaniqlik darajasi

© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.

va unga javoban qabul qilingan muhandislik qarorini qayd etishi kerak. Model drifti muntazam back-testing orqali aniqlanishi zarur. O‘qitish diapazonidan tashqaridagi prognozlar aniq baho sifatida qabul qilinmay, inson ko‘rigi uchun alohida belgilanadi.

Amaliy joriy etish uchun bosqichma-bosqich pilot loyiha tavsiya etiladi. 1-bosqich loyihaviy qattiq jism yoki qazish poligonini amaldagi skanerlangan sirt va yakuniy material manzili bilan bog‘lash orqali ishonchli reja-amal solishtirma nazoratini yo‘lga qo‘yishi kerak. 2-bosqichda tarixiy ishlab chiqarish birliklari asosida yo‘qotish xavfi modeli o‘qitilib, keyingi davrlar ma’lumotlarida tekshiriladi. 3-bosqichda tizim muhandislarga faqat prognozlarni taqdim etadi, operatsiyani avtomatik o‘zgartirmaydi; jamoa noto‘g‘ri ogohlantirishlar va o‘tkazib yuborilgan yuqori yo‘qotish holatlarini baholaydi. 4-bosqichda qo‘shimcha sensor nazorati, portlatish parametrlarini qayta ko‘rib chiqish yoki material manzilini tasdiqlash kabi cheklangan harakatlar uchun optimallashtirish joriy qilinadi. Faqat barqaror samaradorlikka erishilgandan keyingina yuqoriroq avtomatlashtirish darajasi ko‘rib chiqilishi kerak. Bunday ketma-ketlik SI ning tezkor qaror afzalliklaridan foydalanish bilan birga inson vakolati, xavfsizlik mas’uliyati va muhandislik javobgarligini saqlaydi.

XULOSA

Ushbu tadqiqot rudali foydali qazilmalarni qazib olishda ruda yo‘qotishlarini kamaytirish uchun sun’iy intellektdan foydalanishning IMRAD talablariga mos metodik tizimini ishlab chiqdi. Tahlil shuni ko‘rsatdiki, ruda yo‘qotilishi va suyulish mustaqil ko‘rsatkichlar sifatida emas, balki o‘zaro bog‘liq va ayrim holatlarda qarama-qarshi natijalar sifatida boshqarilishi kerak. SI to‘rtta bog‘langan darajada foyda berishi mumkin: geotexnik va portlatish bilan bog‘liq yo‘qotish xavfini prognozlash; sensorlar va mashina ko‘rishi yordamida ruda va bo‘sh jinsni aniqlash; qazib olish hamda marshrut qarorlarini optimallashtirish; raqamli egizak va reja-amal solishtirma nazorati orqali qaror modelini uzluksiz yangilash.

Takror ishlab chiqish mumkin bo‘lgan simulyatsion misolda nolinear ansambl modellari ikki asosiy maqsad bo‘yicha chiziqli regressiyadan ustun keldi. Suyulishda gradient boosting $R^2 = 0,822$, ruda yo‘qotilishida esa extra trees $R^2 = 0,838$ natijani ko‘rsatdi. Illustrativ yopiq siklli boshqaruv ssenariysida suyulish 11,04% dan 8,14% gacha, ruda yo‘qotilishi 7,40% dan 5,51% gacha kamaydi; simulyatsion qazib olish koeffitsiyenti 1,90 foiz punktga, ruda sifati indeksi esa 4,76% ga oshdi. Ushbu raqamlar tizimning ehtimoliy xulqini ko‘rsatadi va haqiqiy kon dala natijalari sifatida da’vo qilinmaydi.

Asosiy amaliy xulosa shundaki, faqat prognozning o‘zi yetarli emas. Konchilik yo‘qotishlarini barqaror kamaytirish uchun sensor va reja-amal solishtirma nazorati ma’lumotlari xavf baholariga aylantiriladigan, nomzod harakatlar geotexnik va ishlab chiqarish cheklovlari bo‘yicha tekshiriladigan hamda amaldagi natijalar qayta kalibrlash uchun tizimga qaytariladigan integratsiyalashgan sikl talab etiladi. Kelgusidagi tadqiqotlarda taklif etilgan tizim muayyan konning uzunlamasına ma’lumotlar to‘plamida tekshirilishi, fazoviy va vaqtli cross-validation strategiyalari taqqoslanishi, prognoz qilinadigan yo‘qotishlarning noaniqligi miqdoriy baholanishi hamda operatsion joriy etishdan oldin kon muhandislari audit qila oladigan izohlanadigan SI usullari sinovdan o‘tkazilishi lozim.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Jung, D., & Choi, Y. (2021). Systematic review of machine learning applications in mining: Exploration, exploitation, and reclamation. Minerals, 11(2), 148. https://doi.org/10.3390/min11020148
2. Azhari, F., Sennersten, C. C., Lindley, C. A., & Sellers, E. (2023). Deep learning implementations in mining applications: A compact critical review. Artificial Intelligence Review, 56, 14367-14402. https://doi.org/10.1007/s10462-023-10500-9

© 2026 International Conference on Multidisciplinary Sciences and Innovations . All Rights Reserved.

3. Nobahar, P., Xu, C., Dowd, P., & Shirani Faradonbeh, R. (2024). Exploring digital twin systems in mining operations: A review. Green and Smart Mining Engineering, 1(4), 474-492. https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.09.003
4. Jang, H., Topal, E., & Kawamura, Y. (2015). Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations using a neuro-fuzzy system. Applied Soft Computing, 32, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.03.043
5. Zhao, X., & Niu, J. (2020). Method of predicting ore dilution based on a neural network and its application. Sustainability, 12(4), 1550. https://doi.org/10.3390/su12041550
6. Erdogan Erten, G., Bozkurt Keser, S., & Yavuz, M. (2021). Grid search optimised artificial neural network for open stope stability prediction. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 35(8), 600-617. https://doi.org/10.1080/17480930.2021.1899404
7. Abd Elwahab, A., Topal, E., & Jang, H. D. (2023). Review of machine learning application in mine blasting. Arabian Journal of Geosciences, 16, 133. https://doi.org/10.1007/s12517-023-11237-z
8. Chimunhu, P., Shirani Faradonbeh, R., Topal, E., Asad, M. W. A., & Ajak, A. D. (2024). Development of novel hybrid intelligent predictive models for dilution prediction in underground sub-level mining. Mining, Metallurgy & Exploration, 41, 2079-2098. https://doi.org/10.1007/s42461-024-01029-8
9. Chimunhu, P., Shirani Faradonbeh, R., Topal, E., Asad, M. W. A., & Ajak, A. D. (2025). Dilution prediction in underground open stope mining using gene expression programming and backpropagation artificial neural network algorithms. Mining Technology, 134(2), 105-120. https://doi.org/10.1177/25726668251348707
10. Mariz, J. L. V., Ferraz, T. S. G., Lima, M. P., Silva, R. M. A., & Jang, H. (2025). Predicting dilution in underground mines with stacking artificial intelligence models and genetic algorithms. Applied Sciences, 15(11), 5996. https://doi.org/10.3390/app15115996
11. Peukert, D., Xu, C., & Dowd, P. (2022). A review of sensor-based sorting in mineral processing: The potential benefits of sensor fusion. Minerals, 12(11), 1364. https://doi.org/10.3390/min12111364
12. Robben, C., & Wotruba, H. (2019). Sensor-based ore sorting technology in mining-Past, present and future. Minerals, 9(9), 523. https://doi.org/10.3390/min9090523
13. Shatwell, D. G., Murray, V., & Barton, A. (2023). Real-time ore sorting using color and texture analysis. International Journal of Mining Science and Technology, 33(6), 659-674. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.03.004
14. Noriega, R., Pourrahimian, Y., & Askari-Nasab, H. (2025). Deep reinforcement learning based real-time open-pit mining truck dispatching system. Computers & Operations Research, 173, 106815. https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106815
15. Ozyurt, M. C. (2026). Prediction of rock fragmentation by blasting using symbolic regression and explainable artificial intelligence. Applied Sciences, 16(15), 7673. https://doi.org/10.3390/app16157673