



**MAHALLIY XOMASHYOLAR ASOSIDAGI KOMPOZITSIYALI  
SORBENTLAR YORDAMIDA OQAVA SUVLARDAN OG'IR METALL  
IONLARINI AJRATIB OLISH VA SORBSIYA KINETIKASI HAMDA  
IZOTERMALARINI TAHLIL QILISH**

*Buxoro davlat texnika universiteti*

*professori Fozilov Sadriddin Fayzullayevich*

*Tadqiqotchi Azimova Fotima Aslon qizi*

**Annotatsiya**

Kompozitsiyali sorbentning metall ionlarini yutish qobiliyatini baholash uchun tozalash foizi, sorbsiya sig'imi va jarayon mexanizmini alohida tushunchalar sifatida ko'rib chiqish zarur. Maqolada biochar va mineral asosidagi sorbentlar uchun pH, sorbent dozasi, kontakt vaqti va boshlang'ich konsentratsiyaning ta'siri birlamchi tadqiqotlar hamda adsorbsion modellashtirish ishlariga tayangan holda tahlil qilindi. Material balansi, kinetik modellar va muvozanat izotermalarini qo'llash shartlari tizimlashtirildi. Tahlil psevdobirinchi va psevdoikkinchi tartibli modelning yaxshi mosligi o'z-o'zidan sorbsiya mexanizmini isbotlamasligini ko'rsatadi. Shuningdek, eritmadagi metall miqdorining kamayishi sirt yutishi bilan birga cho'kish, idish devoriga bog'lanish yoki filtrda ushlanish hissasini ham o'z ichiga olishi mumkin. Mahalliy kompozitsiya uchun mustaqil tajribalar, nazorat namunalari, ionlararo raqobat sinovi va noxiziqli regressiyaga asoslangan tadqiqot tartibi taklif etildi. Natijalar bo'limida adabiyotlardan chiqarilgan qiyosiy va uslubiy xulosalar beriladi. Muayyan mahalliy materialning kinetik konstantalari, maksimal sig'imi yoki tozalash foizi tajriba o'lchovlarisiz belgilanmaydi. Taklif etilgan yondashuv eritma kimyosi bilan matematik tavsifni izchil bog'lash va keyingi eksperimental natijalarni ishonchli rasmiylashtirish imkonini beradi.



**Kalit soʻzlar:** ogʻir metall ionlari, kompozitsiyali sorbent, adsorbsiya, kinetika, Langmuir izotermasi, Freundlich izotermasi, pH, diffuziya, nochiziqli regressiya.

## 1 Kirish

Metall ionlari mavjud oqava suv uchun adsorbsion tozalash jarayoni eritmadagi erigan komponentlarning qattiq faza bilan ta'sirlashuviga asoslanadi. Sorbentning amaliy qiymati ifloslantiruvchini qancha miqdorda va qancha vaqt ichida ushlay olishiga bogʻliq. Shu sababli materialni tavsiflashda muvozanat sigʻimi bilan yutish tezligi birgalikda koʻriladi. Yuqori sigʻimga faqat uzoq kontakt vaqtidan keyin erishilsa, tez oqimli texnologik tizimda kutilgan natija olinmasligi mumkin. Bunday farq laboratoriya sinovi va amaliy jarayon orasidagi asosiy bogʻlanishni belgilaydi.

Biochar va bentonit kompozitsiyalarida uglerodli sirt, kislorodli funksional guruhlar va mineralning almashinuvchi ionlari metall ushlanishida qatnashishi mumkin. Jing va hammualliflar bentonitli biochar uchun kadmiy yutilishini, eritma muhitining ta'sirini va izoterma modellarini oʻrgangan [1]. Magnetizatsiyalangan bentonit va biochar boʻyicha ishda ham kadmiy sorbsiyasining turli hissalarini tekshirilgan [2]. Ushbu natijalar metall yutish bitta universal mexanizm bilan chegaralanmasligini koʻrsatadi. Mahalliy sorbent uchun dominant jarayon alohida dalillar asosida aniqlanishi kerak.

Kinetik va izoterma modellaridan foydalanish katta miqdordagi tajriba ma'lumotini bir nechta parametr bilan ifodalash imkonini beradi. Biroq modelga yaxshi moslashgan egri chiziqning fizik talqini har doim ham yagona emas. Xususan, psevdokkinchi tartibli kinetik tenglamani kimyoviy bogʻlanishning bevosita isboti deb qabul qilish muammoli. Simonin hamda Vareda ishlarida model tanlash, regressiya va mexanizmga oid bunday talqinlarning cheklovlari koʻrsatilgan [3, 4]. Shu sababli model parametrlaridan texnologik qarorga oʻtishda ularning aniqlanish sharoiti ham berilishi zarur.



Maqolaning maqsadi mahalliy xomashyo asosidagi kompozitsiyali sorbentlar yordamida metall ionlarini ajratish uchun ishonchli eksperimental va tahliliy asos yaratishdir. Asosiy vazifalar eritma muhitining ta'sirini izohlash, material balansini to'g'ri tuzish, kinetika va muvozanatni ajratish hamda model tanlash mezonlarini belgilashdan iborat. Tahlil Cu(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II) va Pb(II) kabi ionlarni o'rganish uchun qo'llanadigan umumiy tartibni beradi; barcha ionlar uchun bir xil optimal pH yoki selektivlik qatori taklif qilinmaydi.

## **2 Materiallar va usullar**

### **Tadqiqot dizayni va manbalar bazasi**

Ish qiyosiy ilmiy tahlil va eksperimental metodikani asoslash shaklida bajarildi. Kompozitsiyali sorbentlar haqidagi birlamchi maqolalar, adsorbsiya modellari bo'yicha original va metodologik tadqiqotlar hamda instrumental tahlilning rasmiy metodikasi tanlandi [1–9]. Bibliografik ma'lumotlar nashriyot sahifalari va ilmiy nashrlarning ochiq yozuvlari bo'yicha tekshirildi. Tahlilda tajriba sharoiti ko'rsatilmagan yuqori samaradorlik da'volari mustaqil dalil sifatida ishlatilmadi. Manbalarni tekshirish sanasi 2026-yil 8-oktabrdir.

Adabiyotdagi natija, fizik-kimyoviy izoh va taklif etilgan sinov tartibi alohida talqin qilindi. Kinetik konstantalar va izoterma sig'implari turli tadqiqotlardan yig'ilib o'rtachalashtirilmadi. Turli metall, doza va pHda aniqlangan qiymatlar bir xil material samaradorligining ekvivalent o'lchovi emas. Ushbu maqolaning natijasi mahalliy sorbent uchun tayyor raqamli parametrlar to'plami emas, balki ularni o'lchash va tekshirishning izchil tartibidir.

### **Sorbent va eritmalarini tayyorlash**

Sinov uchun kompozitsiya bilan birga biochar, mineral komponent va bir xil nisbatdagi mexanik aralashma nazoratlari tavsiya etiladi. Sorbent massasi quruq modda hisobiga keltiriladi. Zarracha o'lchami va suvda namlanish tartibi qayd etiladi. Metall tuzlaridan eritma tayyorlanganda kontrion hamda qo'shilgan



kislota yoki ishqor miqdori yoziladi. Faqat metall konsentratsiyasini ko'rsatish eritmaning ion kuchini va kompleks hosil qilish sharoitini to'liq tavsiflamaydi. Davriy idishdagi, ya'ni batch sinovda, eritma va sorbent belgilangan hajmda birga ushlab turiladi.

Boshlang'ich skrinigda har bir metall alohida eritmada tekshiriladi. Keyingi bosqichda bir xil konsentratsiyali aralash metall eritmasi hamda Ca va Mg kabi raqobatchi ionlar ishtirokidagi variantlar tuziladi. Eritma hajmi, aralashtirish tezligi va idish materiali bir xil saqlanadi. Metallning idish devoriga yoki filtrga yo'qotilishini nazorat qilish uchun sorbentsiz eritma bir xil amallar orqali o'tkaziladi. Bu jarayonlar tekshirilmasa, sorbentga tegishli deb hisoblangan natija ortiqcha baholanishi mumkin.

#### Omilar va takrorlar rejasi

1-jadval. Mahalliy sorbentni o'rganish uchun taklif etilgan sinov rejasi

| Omil                   | Boshlang'ich<br>sinov oralig'i | Maqsad                             | Chegaralovchi<br>nazorat             |
|------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Muhit pH<br>qiymati    | Dastlab 3–6                    | Zaryad va metall<br>shakli ta'siri | Sorbentsiz cho'kish<br>va yakuniy pH |
| Sorbent dozasi         | 0,25–2,0 g/L                   | Tozalash va sig'im<br>muvozanati   | Quruq massa va<br>hajm               |
| Boshlang'ich<br>metall | 5–100 mg/L                     | Izoterma shaklini<br>aniqlash      | Eruvchanlik va<br>asbob diapazoni    |
| Kontakt vaqti          | 2 daqiqadan 24<br>soatgacha    | Tezlik va muvozanat                | Dastlabki tez<br>bosqichni qamrash   |





| Omil                 | Boshlang'ich<br>sinov oralig'i | Maqsad                      | Chegaralovchi<br>nazorat                    |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|
| Harorat              | Dastlab 20–40 °C               | Harorat sezgirligi          | pH va eritma<br>tarkibining<br>barqarorligi |
| Raqobatchi<br>ionlar | Suv tarkibiga mos<br>darajalar | Selektivlikni<br>tekshirish | Bir xil ion kuchi<br>bilan taqqoslash       |

Jadvaldagi oraliqlar mualliflik sinov taklifidir; ular aniqlangan optimumni anglatmaydi. Ayrim metall va konsentratsiya uchun yuqori pH chegarasi cho'kish xavfi sababli toraytirilishi mumkin. Raqobatchi ionlar miqdori esa kelajakda tanlanadigan oqava suv tarkibidan olinadi. Boshlang'ich va yakuniy pH alohida qayd etiladi. Sorbent eritma pHsini o'zgartirsa, maqsadli omilning haqiqiy qiymati faqat dastlabki pH bilan tavsiflanmaydi.

Kamida uchta mustaqil tajriba takrori rejalashtirilishi, lekin yakuniy takror soni tarqoqlik va aniqlik talabiga qarab tanlanishi kerak. Tajribalar tasodifiy tartibda o'tkaziladi. Takroriy asbob o'qishlari va alohida tayyorlangan tajribalar ajratiladi. Kinetik nuqtalarni bitta idishdan ko'p marta olish o'rniga bir xil parallel idishlardan foydalanish material balansini soddalashtiradi. Bitta idish ishlatilsa, olingan namuna hajmi va undan chiqarilgan metall massasi hisobga kiritiladi.

#### Metall miqdorini aniqlash va material balans

Metall konsentratsiyasini ICP-OES yoki mos atom-absorbsion usulda aniqlash mumkin. EPA 200.7 metodikasi suv va chiqindi namunalarida metall hamda mikroelementlarni ICP-AES orqali aniqlash uchun rasmiy asos beradi [5]. Eritilgan fraksiya uchun filtrlash, umumiy metall uchun esa tegishli tayyorlash tartibi alohida belgilanadi. Kalibrlash, reagent blanki, nazorat





standarti, namuna qo'shimchasi va aniqlash chegarasi natija sifati bilan birga ko'rsatiladi.

Hajm o'zgarmaydigan oddiy yopiq tizim uchun qattiq fazada ushlangan miqdor va tozalash darajasi quyidagicha hisoblanadi.

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m}, \quad R_t = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%$$

Bu yerda  $C_0$  va  $C_t$  boshlang'ich hamda  $t$  vaqtdagi metall konsentratsiyasi, mg/L;  $V$  eritma hajmi, L;  $m$  quruq sorbent massasi, g;  $q_t$  sig'im, mg/g;  $R_t$  esa foizdagi kamayishdir. Muvozanatda  $C_t$  o'rniga  $C_e$ ,  $q_t$  o'rniga  $q_e$  ishlatiladi. Formulaning sodda shakli namuna hajmi kamaymagan va sorbentsiz yo'qotishlar ahamiyatsiz bo'lganda qo'llanadi. Aks holda tuzatilgan material balansi zarur.

#### Kinetika va muvozanat modellarini hisoblash

Psevdobirinchi tartibli va psevdoinkinchi tartibli modellar mos ravishda quyidagi noxiziqli shakllarda hisoblanadi. Ikkinchi model Ho va McKay tomonidan sorbsiya jarayonlari uchun keng qo'llanadigan ko'rinishda tavsiflangan [6]. Har ikkala model eritma va sorbent sharoiti o'zgarmaydigan tajriba qatoriga qo'llanadi.

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$$

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t}$$

Bu yerda  $k_1$ ning birligi daqiqa<sup>-1</sup>,  $k_2$ ning birligi g/(mg·daqiqa) bo'ladi.  $q_e$  va  $q_t$  mg/g hisobida beriladi. Modellar xuddi bir xil  $q_t$  nuqtalariga moslashtiriladi. Muvozanat qiymatini tajribadan belgilash yoki erkin parametr sifatida baholash tanlovi yoziladi. Bir modelda  $q_e$ ni qat'iy, boshqasida erkin qoldirish natijalarni to'g'ridan-to'g'ri solishtirishni qiyinlashtiradi. Hisoblangan  $q_e$  tajribadagi yakuniy sig'im bilan alohida qiyoslanadi.



Muvozanat izotermasi vaqt sinovida barqarorlik tasdiqlangandan keyin tuziladi. Langmuir va Freundlich ifodalari quyidagicha olinadi [1, 7]. Freundlich koeffitsiyentining birligi tanlangan konsentratsiya va sig'im birliklariga bog'liq ekanligi ko'rsatiladi.

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}, \quad q_e = K_F C_e^{1/n}$$

Langmuir modelida  $q_{\max}$  mg/g,  $K_L$  L/mg hisobida ifodalanadi. Freundlich modelida  $n$  o'lchamsiz,  $K_F$  esa ishlatilgan birliklarga mos koeffitsiyentdir. Izoterma parametrlarini aniqlash uchun boshlang'ich konsentratsiya emas, o'lchangan muvozanat konsentratsiyasi ishlatiladi. Har bir nuqtada muvozanat vaqti yetarliligi tekshiriladi. Past va yuqori konsentratsiya qismlarini qamramagan tajriba maksimal sig'imni ishonchli baholashga yetmasligi mumkin.

#### Regressiya va noaniqlikni baholash

Modellar noxiziqli regressiya bilan moslashtiriladi, qoldiqlar original  $q_t$  yoki  $q_e$  masshtabida baholanadi. RMSE, parametrlarning ishonch oralig'i va fizik mazmuni ko'rsatiladi. O'lchov xatosi konsentratsiya bilan o'zgarsa, vaznlangan regressiya uchun asos beriladi. Kuzatuvlar soniga nisbatan parametrlar ko'payganida tuzatilgan axborot mezon kabi qo'shimcha tanlov ko'rsatkichi ishlatilishi mumkin. Faqat  $R^2$  qiymati orqali murakkabroq modelni avtomatik tanlash tavsiya etilmaydi [3, 4].

### 3 Natijalar

#### pH ta'sirining ikki tomonlama talqini

Tahlil pH sorbent sirtining protonlanishi va metallning eritmadagi shaklini bir vaqtda boshqarishini ko'rsatdi. Kislotalik yuqori bo'lganda ayrim kislorodli guruhlar protonlanadi, vodorod ionlari esa bog'lanish markazlari uchun raqobatlashadi. pH oshishi yutishni kuchaytirishi mumkin. Biroq metallning gidroksidli yoki boshqa kam eruvchan fazaga o'tishi ham eritmadagi





konsentratsiyani kamaytiradi. Shu sababli pH bo'yicha yutish egri chizig'i sirt reaksiyasi va eritma jarayonlari ajratilgan holda talqin qilinadi.

Jing va hammualliflar kadmiyli tizimda pH ta'sirini ko'rsatgan [1]. Mazkur kuzatuv mahalliy sorbent uchun ham pH omilini o'rganish zarurligini asoslaydi, lekin bir materialdagi qulay pHni barcha metallar uchun umumlashtirmaydi. Muhitni bufer bilan saqlash ham neytral yechim emas: bufer komponentlari metallni komplekslashi yoki sirtga yutilishi mumkin. Shu bois bufer qo'llanganda alohida blank va bufer ta'siri sinovi kiritilishi kerak.

#### **Doza va boshlang'ich konsentratsiya**

Sorbent dozasi oshganda eritmada qolgan metall kamayishi mumkin, lekin bir gramm materialga to'g'ri keladigan sig'im bir vaqtda kamayishi ehtimoli mavjud. Bunda ko'proq markazlar metall uchun mavjud bo'ladi, ammo umumiy metall massasi cheklanganligicha qoladi. Natijani faqat foiz bilan taqdim etish foydalanilmagan sorbent ulushini yashiradi. Tahlilga ko'ra, doza tanlashda qoldiq konsentratsiya, tozalash darajasi va solishtirma sig'im birgalikda ko'rsatilishi zarur.

Boshlang'ich konsentratsiya ortishi massa uzatishning harakatlantiruvchi kuchini va markazlarning band bo'lishini o'zgartiradi. Yuqori konsentratsiyada topilgan  $q_{max}$  past konsentratsiyali oqava suvdagi ishchi sig'imga teng emas. Izoterma moslashuvi ishlab chiqarish uchun foydali bo'lishi uchun mo'ljallangan qoldiq konsentratsiya atrofidagi nuqtalar ham olinishi kerak. Shu oraliqda o'lchovning aniqlash chegarasi yetarli bo'lmasa, eritma tozalangan deb xulosa chiqarish ilmiy jihatdan asoslanmaydi.

#### **Kinetik modellar va diffuziya**

Simonin tadqiqoti modellarni odatiy statistik taqqoslash psevdokkinchi tartibli modelni afzal ko'rsatishi mumkinligini tahlil qiladi [3]. Ushbu natijadan kelib chiqib, chiziqlashtirilgan grafikdagi katta  $R^2$  original ma'lumotdagi kichik xatolik bilan tenglashtirilmaydi.  $Q_t$  nuqtalarini o'zgartirmasdan hisoblash





qoldiqlarni bir xil mezonda solishtirish imkonini beradi. Model xatosining vaqt bo'yicha muntazam qolishi, masalan dastlabki bosqichning to'liq tavsiflanmasligi, yaxshi umumiy  $R^2$  ortida ham saqlanishi mumkin.

Vareda tahlilida keng tarqalgan kinetik ifodalar turli tezlikni cheklovchi sharoitlarga mos kelishi ko'rsatiladi [4]. Shuning uchun yaxshi moslikka «kimyoviy sorbsiya isbotlandi» mazmuni berilmaydi. Zarracha o'lchami, aralashtirish tezligi va kontakt vaqtini mustaqil o'zgartirish massa uzatishning rolini tekshirishga yordam beradi. Ichki diffuziyani tahlil qilishda Weber va Morris ishidan kelib chiqadigan yondashuv qo'llanadi [8], lekin empirik chiziqning mavjudligi yagona cheklovchi bosqichni avtomatik aniqlamaydi.

#### **Izoterma va raqobat bo'yicha xulosalar**

Langmuir modeli cheklangan sig'imga yaqinlashuvchi bog'lanishni, Freundlich modeli esa o'rganilgan konsentratsiya oralig'ida darajali bog'lanishni ifodalaydi. Modelning mosligi uning barcha ideal farazlari real kompozitsiyada bajarilganligini isbotlamaydi. Bir nechta faza va faol guruhga ega sirt uchun matematik tavsif bilan mikroskopik mexanizm ajratiladi.  $Q_{max}$  fizik jihatdan o'lchangan plateau bilan qo'llab-quvvatlanmasa, u extrapolatsion parametr sifatida talqin qilinadi.

Aralash metall eritmasi komponentlararo raqobatni tekshiradi. Bir metallning sig'imi kamayib, boshqasini saqlanishi sirt affinitetining farqi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Ammo taqqoslashda pH, ion kuchi va har bir ionning boshlang'ich darajasi bir xil bo'lishi kerak. Modellarni har bir ion uchun alohida moslashtirish bilan cheklanmasdan umumiy material balansi ham tekshiriladi. Kompozitsiyaning selektivligi faqat o'rganilgan ionlar va eritma tarkibi doirasida bayon qilinadi.

2-jadval. Kuzatuvdan mexanizmga o'tishda talab qilinadigan dalillar

| Kuzatuv                         | Ehtimoliy izoh                         | Qo'shimcha tekshiruv                | Yetarli bo'lmagan xulosa         |
|---------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Metall konsentratsiyasi kamaydi | Yutish, cho'kish yoki boshqa yo'qotish | Blank va qattiq faza tahlili        | Barchasi adsorbsiya deb olinishi |
| PSO yaxshi moslashdi            | Empirik tezlik tavsifi                 | Regressiya qoldig'i, mustaqil dalil | Kimyoviy bog'lanish isboti       |
| FTIR tasmasi siljidi            | Sirt muhitining o'zgarishi             | XPS yoki ion balansi                | Yagona kompleks tuzilishi        |
| Ca yoki Mg eritmaga chiqdi      | Ion almashinish yoki erish             | Sorbentsiz va metallsiz nazorat     | Faqat ion almashinish            |
| Yuqori pHda yutish oshdi        | Zaryad yoki eruvchanlik ta'siri        | Eritma shakllari va cho'kish blanki | Umumiy optimal pH                |

#### 4 Muhokama

##### Tozalash darajasi va sig'imning amaliy mazmuni

Texnologik jarayon uchun kerakli qoldiq konsentratsiyaga erishish asosiy maqsadlardan biridir. Sorbentni taqqoslashda esa ishlatilgan massa ham hisobga olinadi. Masalan, shartli hisobda 50 mg/L eritmaning 100 mL hajmida 5 mg metall mavjud bo'ladi. 0,1 g sorbent uchun barcha metall ushlansa ham massa balansidan keladigan yuqori chegara 50 mg/gni tashkil etadi. Bu misol tajriba natijasi emas; u hisoblangan sig'im boshlang'ich metall massasi bilan cheklanishini ko'rsatadi.

Natijalarda fizik chegarani buzadigan sig'im uchrasa, avval birliklar, hajmning litrga aylantirilishi va sorbentning quruq massasi tekshiriladi. «Aniqlanmadi» qiymati nol konsentratsiya sifatida qabul qilinmaydi. Bunday



nuqta aniqlash chegarasi bilan ifodalanadi va tozalash darajasining tegishli chegarasi hisoblanadi. Nazorat standarti qabul mezonidan chiqsa, yuqori sorbsiya ko'rsatkichi ilmiy xulosa uchun ishlatilmaydi. Natijaning katta bo'lishi o'lchov sifatini tekshirish ehtiyojini kamaytirmaydi.

#### Mexanizmni bir nechta dalil bilan asoslash

Metall yutilishi elektrostatik ta'sir, ion almashinish, sirt komplekslanishi va yangi qattiq faza hosil bo'lishining birgalikdagi natijasi bo'lishi mumkin. Bu hissalarini ajratish uchun metall yo'q eritmada sorbentdan ajraladigan ionlar aniqlanadi. Metall mavjud tajriba bilan farq qiyoslanadi. Sorbentning kul qismi katta bo'lsa, mineral komponentlarning erishi va ishqoriylik berishi ham tekshiriladi. Biochar sirt kimyosining xomashyo va pirolizga bog'liqligi bunday taqqoslash uchun muhim omildir [9].

Magnetik yoki oksidli modifikatsiya kiritilganida faol markazlar bilan birga yangi elementning suvga chiqishi ham aniqlanishi kerak [2]. Mexanizmni tasdiqlash uchun qattiq fazada metallning kimyoviy holati, eritmada ionlar va pH birgalikda talqin qilinadi. Faqat EDSda metall pikining paydo bo'lishi qaysi bog'lanish yuzaga kelganini ochmaydi. Shuning uchun spektroskopik usullar natijasi model mosligi bilan bir xil turdagi dalil sifatida ko'rilmaydi.

#### Tajriba dizaynini oqava suvga yaqinlashtirish

Bir komponentli eritma sorbentning asosiy xususiyatini aniqlash uchun qulay, ammo sanoat oqava suvi ko'p komponentli bo'ladi. Tuzlar, organik ligandlar va muallaq zarrachalar metallning mavjud shaklini o'zgartirishi mumkin. Shu sababli avval model eritma, keyin tarkibi nazorat qilinadigan aralash eritma, yakunda haqiqiy suv bilan sinov ketma-ketligi taklif etiladi. Haqiqiy suvga metall qo'shib o'tkazilgan sinov asl suvning tabiiy metall tarkibi bilan bajarilgan sinovdan alohida nomlanadi.

Haqiqiy suvni oldindan filtrlash yutish jarayonini o'rganishni soddalashtiradi, ammo oqava suvning dastlabki holatini o'zgartiradi. Shuning





uchun filtrlashdan oldingi va keyingi metall, muallaq zarrachalar va pH ko'rsatkichlari beriladi. Agar maqsad erigan metallni ajratish bo'lsa, bu tanlov metodikada ochiq ko'rsatiladi. Agar umumiy metallni kamaytirish mo'ljallansa, sorbsiya va mexanik ushlanish hissasi birgalikda material balansiga kiritiladi. Baholanadigan fraksiyani aniq belgilash turli maqolalar natijasini taqqoslashni yaxshilaydi.

#### Kinetik natijadan texnologik parametrga o'tish

Psevdoikkinchi tartibli modelning dastlabki tezlik ko'rsatkichi va yarim yutilish vaqti quyidagi bog'lanish orqali tavsiflanishi mumkin. Bu ko'rsatkichlar faqat model qo'llanadigan tajriba sharoitida mazmunli bo'ladi.

$$h = k_2 q_e^2, \quad t_{1/2} = \frac{1}{k_2 q_e}$$

$k_2$ ning katta bo'lishi har doim material tezroq ishlashini anglatmaydi, chunki  $q_e$  ham ifodaga kiradi. Muvozanat sig'imi turli bo'lgan materiallar uchun kontakt vaqtini bevosita qiyoslash foydaliroq bo'lishi mumkin. Kolonnada esa eritma uzluksiz yangilanadi va massa uzatish sharoiti batch sinovdan farq qiladi. Shuning uchun batch kinetikasidan kelib chiqqan vaqt oqimdagi bo'sh qatlam kontakt vaqti bilan avtomatik tenglashtirilmaydi. Kolonna alohida tajriba bosqichi bo'lib qoladi.

3-jadval. Ilmiy maqolada kinetik va izoterma natijalarini berish mezonlari

| Natija guruhi    | Majburiy ma'lumot                      | Tekshiruv mezonlari                      |
|------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| Material balansi | $C_0$ , $C_t$ , $V$ , $m$ va birliklar | Hisoblangan massa mavjud metallga mos    |
| Kinetika         | Vaqt nuqtalari, harorat, doza          | Yakuniy barqarorlik va dastlabki bosqich |



| Natija guruhi | Majburiy ma'lumot                   | Tekshiruv mezonlari                       |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| Regressiya    | Tenglama shakli, vaznlar, qoldiqlar | Parametr noaniqligi va xatolar taqsimoti  |
| Izoterma      | $C_e$ , muvozanat vaqti, pH         | Parametrlarning o'lchangan sohaga mosligi |
| Mexanizm      | Eritma va qattiq faza dalillari     | Muqobil yo'qotishlar hisobga olingan      |
| Haqiqiy suv   | Fraksiya, tuz va organik tarkib     | Model eritmadan farq izohlangan           |

Tahlil chegarasi shundaki, ushbu ish mahalliy sorbent uchun o'lchangan vaqt qatori yoki konsentratsiya qatorini bermaydi. Shu sababli  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $KL$ ,  $KF$  va  $q_{max}$ ning son qiymatlari hisoblanmagan. Taklif etilgan tartib bu ko'rsatkichlarni kelajakda olish, sifatini tekshirish va ilmiy xulosani o'lchov daliliga bog'lash uchun xizmat qiladi. Muayyan metall bo'yicha selektivlik yoki eng qulay pH haqidagi yakuniy qaror nazoratli eksperimentdan keyin chiqariladi.

## 5 Xulosa

Kompozitsiyali sorbent bilan metall ionlarini ajratishda pH, doza, vaqt va konsentratsiya bir-biriga bog'liq omillardir. Sorbent dozasining oshishi tozalash foizini yaxshilashi mumkin, lekin solishtirma sig'imni ham alohida baholash talab etiladi. Qoldiq konsentratsiya, metallning mavjud shakli va material balans natijaning amaliy mazmunini belgilaydi.

Kinetik va izoterma modellarining mosligi sorbsiya mexanizmi bilan tenglashtirilmasligi kerak. Nochiziqli regressiya, qoldiqlar tahlili va parametr noaniqligi modellarni taqqoslash uchun asos beradi. Mexanizm haqidagi xulosa





esa spektroskopik kuzatuv, ion almashinish balansi va sorbentsiz nazoratlar bilan qo'llab-quvvatlanadi.

Mahalliy sorbent uchun model eritma, raqobatchi ionlar va haqiqiy oqava suvni ketma-ket o'rganish taklif etildi. Har bir bosqichda mustaqil takrorlar, metallning yo'qotilish nazoratlari va instrumental sifat tekshiruvlari saqlanadi. Mazkur uslubiy yondashuv keyingi tajriba maqolasida kinetik konstantalar va izoterma parametrlarini ishonchli aniqlash uchun asos yaratadi.

### **FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR**

1. Jing Y., Cao Y., Yang Q., Wang X. Removal of Cd(II) from aqueous solution by clay-biochar composite prepared from *Alternanthera philoxeroides* and bentonite. *BioResources*. 2020;15(1):598–615. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/removal-of-cdii-from-aqueous-solution-by-clay-biochar-composite-prepared-from-alternanthera-philoxeroides-and-bentonite/>
2. Liu S.-Z. va boshq. Magnetized bentonite modified rice straw biochar: Qualitative and quantitative analysis of Cd(II) adsorption mechanism. *Chemosphere*. 2024;359:142262. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142262>
3. Simonin J.-P. On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. *Chemical Engineering Journal*. 2016;300:254–263. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.079>
4. Vareda J. P. On validity, physical meaning, mechanism insights and regression of adsorption kinetic models. *Journal of Molecular Liquids*. 2023;376:121416. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121416>
5. U.S. Environmental Protection Agency. Method 200.7 Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled



Plasma-Atomic Emission Spectrometry. Revision 4.4. 1994.  
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P10177CN.TXT>

6. Ho Y. S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry. 1999;34(5):451–465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)

7. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal of the American Chemical Society. 1918;40(9):1361–1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>

8. Weber W. J., Morris J. C. Kinetics of Adsorption on Carbon from Solution. Journal of the Sanitary Engineering Division. 1963;89(2):31–59. <https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000430>

9. Banik C., Lawrinenko M., Bakshi S., Laird D. A. Impact of Pyrolysis Temperature and Feedstock on Surface Charge and Functional Group Chemistry of Biochars. Journal of Environmental Quality. 2018;47(3):452–461. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.11.0432>