JOURNAL OF FUTURE
Journal homepage: future- journal.uz

Review Article
Volume 2, Issue 7, 2026

Publisher: Uranium Publishing LLC

ANOR PO‘STLOG‘INI KOMPLEKS QAYTA ISHLASH ORQALI POLIFENOLLI EKSTRAKTLAR VA MIKROELEMENTLI O‘G‘ITLAR OLISH ISTIQBOLLARI: ADABIYOTLARNING TANQIDIY SHARHI

Jasurbek Mahmudjon o‘g‘li Jalolov[1,*], Diloromxon Raxmatjon qizi Jalolova[1], Xurshid Madaminovich Polvonov[1]

[1] Farg‘ona davlat texnika universiteti, Kimyo muhandisligi kafedrasi, Farg‘ona, O‘zbekiston

[*] Corresponding author: jalolov@fstu.uz

ORCID: J.M. Jalolov — 0009-0009-2926-2219; D.R. Jalolova — 0009-0005-9296-1953; X.M. Polvonov — 0000-0002-8163-2004

ARTICLE INFO

Dates:
Received: 24.10.2026
Revised: 29.10.2026
Accepted: 30.10.2026

DOI:
10.66960/jof.3093-8899.00046

Copyright:
CC BY 4.0

ANNOTATSIYA

Anor (*Punica granatum* L.) mevasini sanoat miqyosida qayta ishlash jarayonida hosil bo‘ladigan ikkilamchi biomassa — po‘stloq fraksiyasi ham suvda va suv-spirtli muhitda eruvchan biologik faol polifenollar (punikalagin, ellag kislotasi), ham keyingi texnologik modifikatsiya uchun yaroqli lignotsellyulozali va pektinli qattiq karkas manbayi hisoblanadi. Biroq mavjud ilmiy adabiyotlarda ushbu ikki yo‘nalish — suyuq fazali ekstraksiya hamda qattiq qoldiq asosida mikroelement tashuvchi matritsalar yaratish masalalari aksariyat hollarda bir-biridan uzilgan, mustaqil jarayonlar sifatida tadqiq etilgan. Mazkur tanqidiy sharhda 2022-2026-yillarda xalqaro miqyosda e’lon qilingan 36 ta eksperimental tadqiqot hamda mahalliy anor po‘stlog‘i bioligandlari asosida mis va rux komplekslarini sintez qilishga bag‘ishlangan 2 ta mintaqaviy nashr tizimli tahlil qilindi. Sharhning asosiy maqsadi — laboratoriya sharoitida material olish yoki sorbsiya ko‘rsatkichlarini qayd etish faktini uning tayyor agronomik samaradorligi bilan sun’iy ravishda tenglashtirmasdan, ikki mahsulot oqimini yagona texnologik zanjirga bog‘lash imkoniyatlari va uslubiy chegaralarini baholashdir. Tahlil natijalariga ko‘ra, dastlabki quritish rejimi, ekstragent qutbliligi va fizik-kimyoviy intensivlashtirish usullari nafaqat quruq ekstrakt chiqishini, balki ikkilamchi shrotning g‘ovakliligi va funksional guruhlar saqlanish darajasini ham tubdan o‘zgartiradi. Shuningdek, xom po‘stloq, faollashtirilgan bioko‘mir yoki individual polimer gidrogellarda aniqlangan mis va rux sorbsiyasi ko‘rsatkichlarini ekstraksiyadan chiqqan qoldiqqa to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirib bo‘lmasligi ilmiy asoslandi. Istiqboldagi kompleks tadqiqotlarda bitta xomashyo partiyasi doirasida ekstrakt sifati, qoldiqning strukturaviy tavsifi, miqdoriy metall balansi, desorbsiya kinetikasi va real tuproq-o‘simlik tizimidagi agrobiologik javob uzviy bog‘lanishi zarurligi ko‘rsatib berildi.

Kalit so‘zlar: anor po‘stlog‘i (*Punica granatum* L.), polifenolli ekstraksiya, quruq texnik ekstrakt, ekstraksiya qoldig‘i (shrot), bioligand va xelatlar, mikroelementli o‘g‘itlar, mis va rux desorbsiyasi.

АННОТАЦИЯ

Кожура граната (*Punica granatum* L.), являющаяся крупнотоннажным побочным продуктом переработки плодов, представляет собой ценный источник как экстрагируемых полифенольных соединений (пуникалагина, эллаговой кислоты), так и твердого пектино-лигноцеллюлозного каркаса для последующей химической модификации. Тем не менее в современной научной литературе процессы жидкостной экстракции и получения твердых носителей микроэлементов рассматриваются преимущественно разрозненно. В настоящем критическом обзоре систематизированы результаты 36 международных экспериментальных работ за 2022-2026 годы и двух региональных исследований, посвященных синтезу комплексов меди и цинка с участием биолигандов гранатовой кожуры. Цель обзора заключается в критической оценке возможностей объединения двух продуктовых потоков в единый технологический цикл без необоснованного отождествления факта сорбции металла или спектральных сдвигов с прямой агрономической эффективностью. Показано, что режимы сушки, состав экстрагента и методы интенсификации определяют не только качество сухого экстракта, но и реакционную способность остаточного шрота. Обоснована недопустимость прямого переноса данных по сорбции нативной кожуры или биоугля на проэкстрагированный остаток, а также сформулированы методологические требования к сведению материального баланса и верификации десорбции микроэлементов в системе «почва — растение».

Ключевые слова: кожура граната (*Punica granatum* L.), полифенольная экстракция, сухой технический экстракт, проэкстрагированный шрот, биолиганды и хелаты, микроэлементные удобрения, десорбция меди и цинка.

ABSTRACT

Pomegranate (*Punica granatum* L.) peel, a major agro-industrial by-product, serves both as a rich source of extractable bioactive polyphenols (such as punicalagin and ellagic acid) and as a pectic-lignocellulosic solid matrix suitable for further valorization. However, in the current literature, liquid-phase extraction of phenolics and solid-phase fabrication of micronutrient carriers are predominantly investigated as isolated pathways. This critical review synthesizes findings from 36 international experimental studies published between 2022 and 2026, alongside two regional studies focusing on copper and zinc complexation using pomegranate-derived bio-ligands. The primary objective is to evaluate the methodological feasibility and evidentiary boundaries of integrating extract production with micronutrient fertilizer formulation without conflating chemical synthesis or biosorption capacity with actual agronomic performance. Comparative analysis demonstrates that pre-drying regimes, solvent polarity, and process intensification dictate not only the chemical profile of the dried extract but also the residual functional groups and structural integrity of the spent solid residue. Furthermore, adsorption capacities or controlled-release profiles observed in raw peel, activated biochar, or pure polysaccharide hydrogels cannot be directly extrapolated to solvent-exhausted pomace. Future integrated biorefinery studies must establish a rigorous mass and metal balance within a single technological sequence, linking extract quality, residue characterization, nutrient desorption kinetics, and validated soil-plant biological responses.

Keywords: pomegranate peel (*Punica granatum* L.), polyphenolic extraction, dry technical extract, extraction residue, bio-ligands and chelates, micronutrient fertilizers, copper and zinc release.

How to cite:
Jalolov J.M., Jalolova D.R., Polvonov X.M. (2026). Anor po‘stlog‘ini kompleks qayta ishlash orqali polifenolli ekstraktlar va mikroelementli o‘g‘itlar olish istiqbollari: adabiyotlarning tanqidiy sharhi. *Journal of Future*, 2(7), 1–7. https://doi.org/10.66960/jof.3093-8899.00046

1. Kirish

Agrosanoat majmuasida ikkilamchi o‘simlik xomashyosini chuqur qayta ishlashda asosiy muammo — dastlabki biomassadan qaysi maqsadli komponentlarni selektiv ajratib olish va jarayondan so‘ng hosil bo‘ladigan qattiq fazani qanday qilib yuqori qo‘shilgan qiymatli mahsulotga aylantirish masalalarining o‘zaro texnologik bog‘liqligidadir. Anor (*Punica granatum* L.) po‘stlog‘i ushbu yo‘nalishda eng ko‘p o‘rganilayotgan, biroq sanoat miqyosida to‘liq o‘zlashtirilmagan fito-matritsalardan biri sanaladi. So‘nggi yillardagi fundamental va amaliy izlanishlarda mazkur xomashyodan yuqori antioksidant faollikka ega fenolli ekstraktlar, mikroenkapsulalangan barqaror kukunlar, past metoksilli pektin hamda toza sellyuloza fraksiyalarini ajratib olish imkoniyatlari keng namoyish etilgan [1, 2, 3, 4]. Biroq ushbu tadqiqotlarning aksariyati xomashyoning faqat bitta fraksiyasini maksimal darajada ajratib olishga yo‘naltirilgan. Tahliliy nuqtayi nazardan, turli mualliflar tomonidan alohida-alohida tajribalarda qayd etilgan mahsulot unumlarini (masalan, ekstrakt chiqishi bilan pektin yoki sellyuloza chiqishini) arifmetik tarzda qo‘shib, xomashyoning umumiy konversiya darajasini hisoblash jiddiy metodologik xatoga olib keladi. Negaki, mazkur tajribalar bir-biridan keskin farq qiluvchi gidromodul, harorat, pH muhiti hamda genetik jihatdan turlicha bo‘lgan xomashyo partiyalarida bajarilgan. Haqiqiy kompleks (biorefinery) jarayonida esa birinchi bosqichda qo‘llangan ekstraksiya rejimi ikkinchi bosqichga o‘tadigan qattiq qoldiqning kimyoviy tarkibi va morfologiyasini bevosita belgilab beradi, ya’ni komponentlarning suyuq va qattiq oqimlar o‘rtasida taqsimlanish balansi birlamchi ahamiyat kasb etadi.

Ekstraksiya jarayonidan chiqqan qattiq qoldiq (shrot) yoki po‘stloq fraksiyalari asosida mikroelementli agrokimyoviy vositalar olish g‘oyasi masalani yanada murakkablashtiradi va materialshunoslik hamda agrokimyo tutashgan nuqtada yangi talablarni yuzaga keltiradi. O‘simlik biomassasi tarkibidagi polifenol, karboksil va gidroksil guruhlar d-metall ionlarini (xususan, Cu^{2+} va Zn^{2+}) suvli eritmalardan yuqori darajada bog‘lab olish qobiliyatiga ega ekani ko‘plab sorbsion tadqiqotlarda isbotlangan. Lekin oqova suvlarni tozalash (remediatsiya) uchun

katta yutuq hisoblangan «metallni mustahkam va qaytarilmas tarzda tutib qolish» xususiyati o‘g‘it texnologiyasida teskari natija — elementning tuproq eritmasiga o‘tmasligi va o‘simlik ildizi uchun biologik mavjud bo‘lmasligi xavfini tug‘diradi. Aksincha, matritsa bilan zaif fizik adsorbsiya orqali bog‘langan metall namlik ta’sirida bir necha soat ichida yuvilib ketib (burst release), ildiz atrofida lokal fitotoksik konsentratsiya hosil qilishi va granulalashdan kutilgan uzoq muddatli (slow/controlled release) ta’sirni yo‘qqa chiqarishi mumkin. Mis saqlovchi alginat-poliuretan qoplamalar hamda rux yetkazib beruvchi gibrid gidrogellar bo‘yicha olib borilgan zamonaviy tadqiqotlar metallni matritsaga yuklash (loading) bilan uni tuproq muhitida boshqariluvchan desorbsiyalash o‘rtasidagi ushbu nozik muvozanatning amaliy ahamiyatini yaqqol ko‘rsatadi [5, 6, 7]. Demak, anor po‘stlog‘ini dastlabki ekstraksiyalash va keyingi granulalash bosqichlari mikroelementning yakuniy ekspluatatsiya sharoitidagi harakatchanligiga qanday ta’sir ko‘rsatishi alohida tekshirilishi shart.

So‘nggi yillarda mintaqaviy ilmiy maktablarda ham mahalliy anor po‘stlog‘idan biologik faol ligandlar ajratib olish va ular ishtirokida mis hamda ruxning biokomplekslarini (bioxelatlarini) sintez qilish bo‘yicha dastlabki e’tiborga molik natijalar olindi [8, 9]. Xususan, Jalolov va hammualliflar (2026) hamda Askarov va hammualliflar (2026) tomonidan chop etilgan ishlarda anor po‘stlog‘i asosidagi organik ligandlarning Cu^{2+} va Zn^{2+} ionlari bilan koordinatsion bog‘lanish hosil qilishi IQ-Furye (FTIR) spektroskopiyasi orqali asoslab berilgan [8, 9]. Ushbu nashrlar respublikada ikkilamchi agro-xomashyolardan mikroelementli o‘g‘itlar yaratish bo‘yicha milliy ilmiy yo‘nalish shakllanayotganini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, ilmiy xolislik nuqtayi nazaridan, har qanday tadqiqot xulosasi unda amalda bajarilgan o‘lchovlar doirasidagina talqin etilishi lozim. Infraqizil spektrdagi valent va deformatsion tebranish polosalarining siljishi (masalan, —OH va —COOH guruhlar intensivligining o‘zgarishi hamda yangi metall-kislorod bog‘larining paydo bo‘lishi) ligand va metall o‘rtasida kimyoviy ta’sirlashuv sodir bo‘lganini ishonchli tasdiqlaydi, biroq bu fakt o‘z-o‘zidan mahsulotning tuproqdagi desorbsiya kinetikasini, o‘simlik tomonidan o‘zlashtirilish koeffitsiyentini, dala sharoitidagi hosildorlikka ta’sirini yoki ekologik xavfsizligini avtomatik ravishda kafolatlamaydi. Xuddi shu qat’iy metodologik mezon xalqaro jurnallarda e’lon qilingan barcha sorbsion va sintetik ishlarga nisbatan ham birdek tatbiq etilishi kerak.

Mazkur tanqidiy sharhning asosiy maqsadi — anor po‘stlog‘idan texnik va biologik faol ekstraktlar olish texnologiyasi bilan mikroelement tashuvchi qattiq matritsalar (granulalar, biokompozitlar) yaratishga oid tarqoq ilmiy dalillarni tizimli ravishda bog‘lash, shuningdek, eksperimental jihatdan isbotlangan natijalar bilan faraziy (taklif etilayotgan) qo‘llanish sohalari o‘rtasidagi ilmiy chegarani aniq belgilashdan iboratdir. Buning uchun maqolada ikkala mahsulot oqimining (suyuq ekstrakt va qattiq faza) sifat ko‘rsatkichlari, ularni shakllantirish usullari va mavjud eksperimental isbotlarning darajasi qiyosiy tahlil qilinadi hamda ekstraksiya qoldig‘ini to‘laqonli o‘g‘it komponenti sifatida baholashdan avval qanday fizik-kimyoviy va agrobiologik o‘lchovlar bajarilishi zarurligi muhokama etiladi. Sharh doirasida mualliflarning hali e’lon qilinmagan xususiy eksperimental ma’lumotlari yoki aniq texnologik reglamentlari ochiqlanmaydi, balki kompleks qayta ishlashning konseptual-metodologik poydevori shakllantiriladi.

2. Materiallar va usullar

2.1. Adabiyotlarni qidirish strategiyasi va manbalarni saralash

Ushbu maqola maqsadli tanqidiy-tahliliy sharh (focused critical narrative review) shaklida tayyorlangan bo‘lib, adabiyotlar qidiruvi xalqaro ilmiy nashriyotlar platformalari (ScienceDirect/Elsevier, SpringerLink, Wiley Online Library, MDPI, ACS Publications, Taylor & Francis, PLOS), PubMed biotibbiyot bazasi hamda Google Scholar tizimi orqali amalga oshirildi. Qidiruvning yakuniy sanasi sifatida 2026-yil 24-oktabr qabul qilindi. Zamonaviy texnologik tendensiyalarni qamrab olish maqsadida xronologik chegara sifatida 2022-2026-yillardagi jurnal jildlarida chop etilgan ishlar tanlab olindi (maqolaning dastlabki elektron varianti — Online First oldinroq e’lon qilingan holatlarda bibliografik ro‘yxatda jurnalning rasmiy jild va nashr yili saqlandi). Qidiruv so‘rovlarida «pomegranate peel» tayanch iborasi «extraction», «drying», «encapsulation», «pectin», «cellulose», «copper», «zinc» va «alginate» kalit so‘zlari bilan mantiqiy operatorlar yordamida birlashtirildi. Ikkilamchi qattiq matritsalardan oziqa moddalarining ajralish mexanizmlarini qiyosiy baholash uchun qo‘shimcha ravishda «micronutrient fertilizer», «biochar», «hydrogel beads» va «controlled release» birikmalari bo‘yicha manbalar jalb etildi.

Dastlabki saralashdan so‘ng yakuniy tahliliy to‘plamga 36 ta xalqaro eksperimental maqola hamda mahalliy xomashyo asosida mis va rux mikroo‘g‘itlari olishga bag‘ishlangan 2 ta mintaqaviy ilmiy nashr [8, 9] (jami 38 ta manba) kiritildi. Xalqaro manbalarning ilmiy nufuzi va Scopus/Web of Science bazalaridagi qamrovi tegishli nashriyotlarning rasmiy indekslanish ma’lumotlari hamda DOI identifikatorlari orqali jurnal darajasida tekshirildi. Takroriy qaydlar, taqrizdan o‘tmagan preprintlar, belgilangan davrdan (2022-2026) tashqaridagi maqolalar hamda eksperimental metodikasi noaniq bo‘lgan manbalar tahlildan chiqarib tashlandi. Anor po‘stlog‘idan boshqa tashuvchilarga (masalan, montmorillonit gili, akatsiya yelimi, modifikatsiyalangan bioko‘mir yoki ksilan-alginat matritsalariga) oid o‘g‘it tadqiqotlari faqatgina granulalash tamoyillari, desorbsiya kinetikasini o‘lchash usullari va vegetatsion sinov dizaynini qiyosiy tahlil qilish maqsadida kiritildi hamda matnda ularning qaysi tabiiy yoki sintetik matritsaga taalluqli ekani qat’iy ajratib ko‘rsatildi.

2.2. Manbalarni qiyosiy tahlil qilish va baholash mezonlari

Tahlil jarayonida obyektni noto‘g‘ri umumlashtirishning oldini olish maqsadida qattiq fazaning beshta holati qat’iy farqlandi: (1) dastlabki xom (nativ) po‘stloq, (2) erituvchi bilan ekstraksiyalashdan keyin qolgan qattiq qoldiq (shrot), (3) kimyoviy yo‘l bilan ajratib olingan individual biopolimer fraksiyasi (pektin yoki sellyuloza), (4) termokimyoviy piroliz/faollashtirish mahsuloti (bioko‘mir, faollashtirilgan uglerod) va (5) tashqi bog‘lovchi polimerlar bilan shakllantirilgan kompozit gidrogellar yoki qoplamali granulalar. Ekstraksiyaga oid ishlarda ekstragent tabiati, xomashyoga dastlabki ishlov berish (quritish, maydalash, bug‘-portlatish), optimallashtirilgan javob funksiyalari hamda unumni hisoblash bazisi (xom vaznga, mutlaq quruq vaznga yoki ekstrakt quruq qoldig‘iga nisbatan) qiyoslandi. Mikroelementli tizimlarda esa metallni matritsaga kiritish usuli, haqiqiy tutib qolish (retention) ulushi, suv va tuproq muhitidagi desorbsiya kinetikasi hamda o‘simlikdagi fiziologik javobga oid dalillar alohida-alohida baholandi. Oziq-ovqat mahsulotlarini saqlash (masalan, o‘simlik moylari yoki sous-larda oksidlanishni sekinlashtirish) yoki oshqozon-ichak muhitini imitatsiya qiluvchi in vitro sinovlarda olingan kapsulalash va ajralish natijalari tuproq-agrokimyoviy muhitdagi samaradorlikka to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirilmadi, bunday ishlar faqatgina quruq ekstraktlarni barqarorlashtirish va faza-taqsimlanish mexanizmlarini tushuntirish uchun uslubiy asos sifatida jalb etildi.

3. Natijalar va muhokama

3.1. Xomashyoni dastlabki tayyorlash va fraksiyalashning keyingi texnologik bosqichlarga ta’siri

Anor po‘stlog‘ini qayta ishlash zanjirining samaradorligi ekstraksiya reaktoridan ancha oldin — xomashyoni yig‘ish, navini saralash, quritish va granulometrik maydalash bosqichlarida shakllanadi. Cano-Lamadrid va hammualliflar (2023) tomonidan o‘tkazilgan ko‘p omilli tadqiqotda anor navi, dastlabki quritish usuli, zarracha o‘lchami va ekstraksiya haroratining punikalagin izomerlari hamda umumiy fenolli birikmalar chiqishiga o‘zaro sinergetik va antagonistik ta’siri isbotlangan [10]. Xuddi shuningdek, Wu va hammualliflar (2025) turli termik va sublimatsion quritish usullarini qiyoslab, suvsizlantirish rejimi nafaqat quruq biomassadagi faol polifenollar miqdorini, balki olingan ekstraktlarning antifungitsid va antioksidant xossalarini ham sezilarli darajada o‘zgartirishini ko‘rsatgan [11]. Ushbu eksperimental faktlardan kelib chiqadigan muhim texnologik xulosa shuki, bir geografik hudud yoki ma’lum navdagi anor po‘stlog‘i uchun optimallashtirilgan ekstraksiya rejimi boshqa partiyadagi xomashyoga to‘g‘ridan-to‘g‘ri «tayyor standart»

sifatida ko‘chirilishi mumkin emasligi, u yangi tajribalar seriyasida dastlabki boshlang‘ich nuqta vazifasinigina o‘taydi.

Biomassaning kimyoviy geterogenligi faqat past molekulyar fenolli birikmalar bilan cheklanmasdan, uning strukturaviy karkasini tashkil etuvchi polisaxaridlar ham ishlov berish sharoitiga o‘ta sezgir hisoblanadi. Masalan, Podetti va hammualliflar (2023) ekologik xavfsiz ekstraksiya jarayonini ko‘p maqsadli optimallashtirish orqali polifenollar bilan boyigan pektin fraksiyasini ajratib olgan bo‘lsa [3], Siddiqui va hammualliflar (2024) ketma-ket ishqoriy va oqartiruvchi kimyoviy ishlovlar yordamida po‘stloqdan yuqori kristallik darajasiga ega bo‘lgan sellyuloza ajratgan [4]. Mazkur ishlar anor po‘stlog‘ida qimmatli biopolimer karkas mavjudligini tasdiqlaydi, biroq ularning natijalari neytral suv yoki suv-etanol aralashmasida yumshoq ekstraksiya qilinganidan so‘ng qoladigan qattiq qoldiq (shrot) xossalarini ifodalamaydi. Suv-spirtli ekstraksiyadan chiqqan shrotda eruvchan qandlar va erkin taninlarning asosiy qismi yuvilib ketgan bo‘lsa-da, erimaydigan protopektin, gemitsellyuloza, lignin hamda matritsa bilan mustahkam bog‘langan (bound) fenol kislotalari saqlanib qoladi. Aynan shu qoldiq funksional guruhlarning nisbati va zarrachalarning ikkilamchi g‘ovakliligi uning keyingi bosqichda mikroelement bog‘lovchi matritsa yoki granula to‘ldiruvchisi sifatidagi haqiqiy texnologik qiymatini belgilaydi.

Resurs tejamkorligi va «yashil kimyo» tamoyillarini baholashda ham ushbu moddiy balans nuqtayi nazari qat’iy saqlanishi lozim. Birinchi bosqichda yuqori navli fenolli ekstrakt olinganining o‘zi qattiq qoldiqning hech qanday qo‘shimcha sarf-xarajatlarsiz tayyor xomashyoga aylanganini anglatmaydi. Nam shrotni qoldiq organik erituvchidan tozalash, yuvish, qayta quritish yoki uning sorbsion faolligini oshirish uchun kimyoviy modifikatorlar bilan ishlov berish qo‘shimcha energiya va reagent talab qiladi. Qattiq qoldiqni mikroo‘g‘it tarkibiga kiritish, shubhasiz, chiqindiga chiqariladigan ikkilamchi biomassa hajmini keskin kamaytiradi. Biroq texnologiyani «mutlaqo chiqindisiz» (zero-waste) deb e’tirof etish uchun erituvchi bug‘lanishidagi yo‘qotishlar, filtrat va chayindi suvlari hamda chang-mayda fraksiyalarning to‘liq moddiy balansi hisobga olinishi shart.

3.2. Ekstraksiya jarayonini intensivlashtirish: unumdorlik, selektivlik va qattiq faza holati o‘rtasidagi muvozanat

Suyuq fazali ekstraksiyaning samaradorligi har doim oldinga qo‘yilgan texnologik vazifa orqali belgilanadi. Feng va hammualliflar (2022) toza suv hamda turli konsentratsiyadagi suv-etanol aralashmalarida olingan po‘stloq ekstraktlarining fitokimyoviy profili va biologik faolligi bir-biridan sezilarli farq qilishini eksperimental ko‘rsatib bergan [1]. Kupnik va hammualliflar (2022) esa an’anaviy erituvchili ekstraksiya bilan o‘ta kritik flyuid (CO_2) ekstraksiyasini taqqoslab, ajratib olingan antimikrob va biofaol birikmalar spektridagi tafovutlarni aniqlagan [12]. Bu tadqiqotlar ekstraksiyaning yuqori darajada tanlovchan (selektiv) jarayon ekanini namoyon etadi: umumiy quruq ekstrakt (ekstraktiv moddalar) chiqishini maksimallashtirish, individual marker birikmani (masalan, punikalaginni) boyitish yoki ma’lum biologik faollikni saqlab qolish — uchta turli xil optimallashtirish vazifasi bo‘lib, ularning optimal nuqtalari bitta texnologik rejimda ustma-ust tushmasligi tabiiy.

Massa almashinuvini tezlashtirish maqsadida so‘nggi yillarda fizik va biokimyoviy intensivlashtirish usullari keng qo‘llanilmoqda. Xususan, Andishmand va hammualliflar (2023) ultratovush kavitatsiyasini dinamik matseratsiya bilan uyg‘unlashtirib, fenollar chiqishini optimallashtirgan bo‘lsa [13], Patil va hammualliflar (2024) ultratovush hamda fermentativ gidrolizning sinergetik ta’sirini o‘rgangan [14]. Yu va hammualliflar (2023) esa dastlabki bug‘-portlatish (steam explosion) usuli hujayra devorlarini parchalab, ichki diffuziya qarshiligini kamaytirishini va ekstraksiya kinetikasini tezlashtirishini modellash orqali ko‘rsatgan [15]. Singh va hammualliflarning ketma-ket chop etilgan ikkita tadqiqotida (2024, 2025) mikroto‘lqinli nurlanish, ultratovush va ularning gibrid (ultrasound-microwave) kombinatsiyasi parametrik optimallashtirish, kinetika hamda termodinamika nuqtayi nazaridan batafsil tahlil qilingan [18, 19]. Mazkur intensiv usullar hujayra matritsasini yemirib, suyuq fazaga modda o‘tish vaqtini qisqartiradi. Biroq ikki mahsulotli (ekstrakt + mikroo‘g‘it) kompleks texnologiya nuqtayi nazaridan masalaning ikkinchi tomoni ham bor: o‘ta kuchli kavitatsiya, mikroto‘lqinli qizdirish yoki fermentativ destruksiya qattiq faza — pektin-sellyuloza karkasining molekulyar massasini va mexanik mustahkamligini pasaytirib yuborishi mumkin. Natijada birinchi bosqichda ekstraksiya vaqti yutilgani holda, ikkinchi bosqichda qoldiqni filtrlash qiyinlashishi va granula shakllantirish uchun ko‘proq tashqi bog‘lovchi polimer sarflanishi ehtimoli yuzaga keladi.

Muqobil erituvchilar va biotexnologik yondashuvlar qo‘llanilganda ushbu texnologik murosa (trade-off) yanada yaqqol ko‘rinadi. Kim va Yoon (2023) chuqur evtektik erituvchilar (DES) yordamida umumiy polifenollar, punikalagin va ellag kislotasi chiqishini javob sirti metodologiyasi (RSM) asosida optimallashtirgan [16], Liu va hammualliflar (2024) esa glitserin-karbamid asosidagi «yashil» erituvchi va ultratovush yordamida olingan ekstraktni UPLC-Q-TOF-MS/MS orqali chuqur identifikatsiya qilgan [17]. Analitik kimyo va suyuq konsentratlar olish uchun DES tizimlari juda samarali bo‘lsa-da, uchuvchan bo‘lmagan evtektik erituvchilardan sochiluvchan quruq texnik ekstrakt ajratib olish nihoyatda murakkab texnologik muammodir. Bunday tizimlarda quruq massa o‘lchanganda erituvchining o‘z komponentlari (masalan, glitserin yoki karbamid) po‘stloqdan ajralgan tabiiy ekstraktiv moddalar bilan chalkashtirilmasligi kerak. Xuddi shuningdek, Vafajoo va hammualliflarning (2024) biomimetik fermentatsiya usuli [20] hamda Aydin va hammualliflarning (2025) fermentativ suyultirishni ultrafiltratsiya membranasi bilan birlashtirgan texnologiyasi [21] fenollarni ajratishning innovatsion yo‘llarini ochib bersa-da, ulardan chiqadigan ikkilamchi oqimlar (fermentlangan biomassa yoki membrana retentati) klassik suv-spirtli ekstraksiya shrotidan kimyoviy tarkibi bo‘yicha tubdan farq qiladi (1-jadval).

3.3. Quruq texnik ekstraktlarni shakllantirish, kapsulalash va sifat ko‘rsatkichlarini standartlashtirish

Suyuq ekstraktlar mikrobiologik buzilishga moyilligi hamda tashish va saqlash xarajatlarining yuqoriligi sababli sanoatda ko‘pincha quruq kukun (quruq texnik yoki tozalangan ekstrakt) shakliga o‘tkaziladi. Biroq erituvchini vakuum-bug‘latish yoki quritish orqali qattiq faza olinganining o‘zi mahsulotning suvda qayta to‘liq eruvchanligini, gigroskopik barqarorligini yoki faol moddalarning saqlanganini kafolatlamaydi. Adabiyotlarda quruq kukunlar xossalarini yaxshilash bo‘yicha keltirilgan natijalarni tahlil qilishda mahsulotning haqiqiy tarkibiga alohida e’tibor qaratish zarur. Masalan, Hadree va hammualliflar (2023) po‘stloq polifenollari bilan boyitilgan anor sharbatini purkab quritish (spray drying) jarayonini RSM orqali modellashtirib, kukun namligi, eruvchanligi va oquvchanligini baholagan [22]. Ushbu tizimda po‘stloq ekstrakti bilan bir qatorda sharbatning o‘z qandlari va organik kislotalari ham ishtirok etadi, shu bois unda qayd etilgan fizik-kimyoviy ko‘rsatkichlarni tashuvchisiz (toza) po‘stloq ekstraktiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirib bo‘lmaydi.

Mikroenkapsulalash bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlarda yordamchi qobiq materiallarining (wall materials) roli yaqqol namoyon bo‘ladi. Yang va hammualliflar (2022) Jorjiyada yetishtirilgan anor po‘stlog‘idan ajratilgan polifenol va pektin asosida mikroenkapsulalangan kukunlar olib [2], keyingi tadqiqotda (2024) ushbu kapsulalarning salat sous-larida lipidlar oksidlanishini sekinlashtirishini isbotlagan [23]. Zhang va hammualliflar (2024, 2025) purkab quritilgan po‘stloq polifenollarini barqarorlashtirishda zardob oqsili izolati (WPI), β-siklodekstrin hamda turli polisaxarid-oqsil kombinatsiyalarini qiyoslab, qobiq turi zarracha morfologiyasi, termik chidamlilik va antioksidant faollikka bevosita ta’sir qilishini ko‘rsatgan [24, 25]. Chezanoglou va hammualliflar (2023) esa po‘stloq ekstraktini saxaroza matritsasida ko-kristallash orqali quruq kukun shakliga keltirgan [26], Rashid va hammualliflar (2022) esa ultratovushda olingan ekstraktni nanoenkapsulalab, oziq-ovqat moylarining saqlash muddatini uzaytirishda sinovdan o‘tkazgan [27]. Metodologik jihatdan bu ishlar ikki muhim xulosani beradi: birinchidan, kapsulalangan kukunlarda yakuniy quruq massaning salmoqli qismini yordamchi tashuvchi (maltodekstrin, oqsil, siklodekstrin yoki saxaroza) tashkil etadi, shuning uchun tashuvchisiz (native dry extract)

1-jadval. Anor po‘stlog‘ini ekstraksiyalash yo‘nalishlari va natijalarni kompleks texnologiyaga tatbiq etish chegaralari

Qayta ishlash va ekstraksiya yo‘nalishi	Adabiyotlarda tasdiqlangan asosiy ilmiy dalillar	Kompleks jarayon (ekstrakt + qoldiq) uchun metodologik talqin va cheklovlar
Dastlabki quritish va fraksiyalash [10, 11]	Anor navi, quritish usuli, zarracha o‘lchami va harorat punikalagin hamda polifenollar saqlanishiga bevosita ta’sir qiladi.	Bir partiya uchun topilgan optimal rejim boshqa xomashyo partiyasiga tekshiruvsiz ko‘chirilmaydi, dastlabki namlik va maydalik standartlashtirilishi shart.
An’anaviy suvli va suv-etanolli ekstraksiya [1, 12]	Erituvchi qutbliligi (etanol/suv nisbati) quruq modda chiqishi, fenol profili va antimikrob/antioksidant faollikni belgilaydi.	Uchuvchan erituvchini haydash (rekuperatsiya) oson va qoldiq shrot begona reagentlar bilan ifloslanmaydi, biroq ekstraksiya selektivligi oldindan belgilanishi lozim.
Fizik va fermentativ intensivlashtirish (UT, MT, bug‘-portlatish) [13–15, 18, 19]	Kavitatsiya, mikroto‘lqin, bug‘ zarbasi va fermentlar hujayra devorini yemirib, massa almashinuvi kinetikasini sezilarli tezlashtiradi.	Ekstraksiya vaqti qisqarsada, matritsaning haddan tashqari destruksiyasi qoldiq shrotning mexanik karkasini va sorbsion xossalarini o‘zgartirishi hisobga olinishi kerak.
Chuqur evtektik erituvchilar (DES) [16, 17]	Glitserin-karbamid va boshqa DES tizimlari individual polifenollar (punikalagin, ellag kislotasi) ajralishini kuchaytiradi.	Erituvchining past uchuvchanligi sababli toza quruq ekstrakt olish qiyin, qoldiq shrotda qolgan DES komponentlari (masalan, karbamid) moddiy balansda alohida hisoblanishi zarur.
Biotexnologik fermentatsiya va membrana ultrafiltratsiyasi [20, 21]	Biomimetik fermentatsiya va fermentativ suyultirish + ultrafiltratsiya fenolli fraksiyalarni yuqori tozalikda ajratish imkonini beradi.	Hosil bo‘ladigan ikkilamchi faza (retentat yoki biomassa) oddiy ekstraksiya shrotiga tenglashtirilmaydi, qo‘shimcha suyuq oqimlar utilizatsiyasi talab etiladi.

texnik ekstrakt olganda gigroskopiklik va eruvchanlik muammolari mustaqil ravishda hal etilishi kerak. Ikkinchidan, har qanday quruq ekstraktning tovar xossalari (qoldiq namlik, suvda erimaydigan cho‘kma ulushi, pH, punikalagin/polifenol miqdori) u bevosita qo‘llaniladigan soha talablari asosida standartlashtirilishi shart.

3.4. Ekstraksiya qoldig‘i (shrot) — ikkilamchi xomashyo va metall bog‘lovchi matritsa sifatida

Ekstraksiya jarayonidan so‘ng reaktorda qoladigan qattiq faza — shrotni shunchaki «ishlatilgan po‘stloq» deb atash uning fizik-kimyoviy tabiatini haddan tashqari soddalashtirish bo‘lar edi. El Fihry va hammualliflar (2024) behi va anor po‘stlog‘idan ajratilgan pektinlarning tuzilishi, esterifikatsiya darajasi hamda reologik-funksional xossalarini qiyosiy o‘rganib, anor pektinining o‘ziga xos galakturon kislotasi zanjirlari va funksional guruhlarga ega ekanini ko‘rsatgan [28]. Ushbu natijalar Podetti va hammualliflar (2023) tomonidan tavsiflangan polifenolga boy past metoksilli pektin xususiyatlari bilan hamohangdir [3]. Suvli yoki suv-etanolli ekstraksiya davomida erkin fenollarning chiqib ketishi qattiq matritsadagi ayrim koordinatsion markazlarni kamaytirsa-da, bir vaqtning o‘zida hujayra devorlarining shishishi va g‘ovaklarning ochilishi hisobiga pektin hamda gemitsellyulozaning karboksil (–COOH) va gidroksil (–OH) guruhlariga metall ionlarining diffuzion yaqinlashishini osonlashtirishi mumkin. Biroq bu ikki qarama-qarshi omildan qaysi biri ustun kelishini faqatgina nazariy mulohaza yoki qoldiq vaznining kamayishi orqali aniqlab bo‘lmaydi, buning uchun xom po‘stloq va ekstraksiya shroti bir xil mutlaq quruq massa asosida qiyosiy eksperimental sinovdan o‘tkazilishi kerak.

Adabiyotlarni tahlil qilishda qattiq biomassaning termokimyoviy modifikatsiya mahsulotlarini oddiy ekstraksiya qoldig‘idan qat’iy farqlash zarur. Masalan, Saadi va hammualliflar (2023) anor po‘stlog‘ini ortofosfat kislota (H_3PO_4) ishtirokida termik faollashtirish orqali g‘ovakli faollashtirilgan ko‘mir (activated carbon) sintez qilgan va uning suvli eritmalardan mis (Cu^{2+}) ionlarini yuqori samaradorlik bilan adsorbsiyalashini isbotlagan [29]. Bu tadqiqot anor po‘stlog‘i hosilalarining misga nisbatan afinitetini ko‘rsatuvchi muhim dalil bo‘lsa-da, piroliz va kislotali aktivatsiya natijasida hosil bo‘lgan uglerodli adsorbentning solishtirma yuzasi, g‘ovak hajmi va sirt funksional guruhlari karbonlashtirilmagan (native yoki solvent-extracted) shrotdan tubdan farq qiladi. Shunday ekan, faollashtirilgan ko‘mirda erishilgan maksimal adsorbsiya sig‘imini to‘g‘ridan-to‘g‘ri ekstraksiya qoldig‘iga nisbatan kutish ilmiy jihatdan asosli emas.

3.5. Metall-ligand ta’sirlashuvi va sorbsiya ko‘rsatkichlarini agronomik samaradorlikdan farqlash

Biopolimer va o‘simlik matritsalarining o‘tish metallari bilan ta’sirlashuvini baholashda ko‘pincha ekologik remediatsiya (suv tozalash) uchun yaratilgan kompozitlar tajribasiga murojaat qilinadi. Lalchand va hammualliflar (2025) og‘ir metallarni suvdan ajratib olish maqsadida natriy alginat va anor po‘stlog‘i kukuni asosida gibrid gidrogel sferalarini sintez qilgan [30]. Mualliflar o‘rganilgan eksperimental sharoitda kompozitning mis (Cu^{2+}) ionlarini maksimal yutish qobiliyatini 42,37 $\pm$ 3,35 mg/g darajasida qayd etgan [30]. Anor po‘stlog‘i zarralarini alginat to‘ri bilan birlashtirish g‘oyasi mikroelementli granulalar yaratish texnologiyasiga juda yaqin turadi. Biroq bu yerdagi 42,37 mg/g ko‘rsatkichi muvozanatdagi sorbsion yutilish sig‘imi bo‘lib, u yuvish va quritishdan keyingi tayyor o‘g‘it granulasidagi misning yakuniy massa ulushini ham, tuproqqa kiritilganda o‘simlik o‘zlashtira oladigan almashinuvchi mis miqdorini ham anglatmaydi.

Aynan shu nuqtada mintaqaviy tadqiqotlarda [8, 9] erishilgan natijalarni xalqaro tajriba bilan uzviy bog‘lagan holda tahlil qilish muhim ahamiyatga ega. Jalolov, Asqarov va Abdugapparov (2026) tomonidan chop etilgan tadqiqotda mahalliy anor (*Punica granatum* L.) po‘stlog‘iga ishqoriy-oksidlovchi (1% NaOH va 3% H_2O_2) ishlov berish orqali koordinatsion faol bioligand ajratib olingan hamda uning mis sulfat bilan reaksiyasi natijasida 43% unum bilan Cu-bioxelat sintez qilingan [8]. Mualliflar IQ-Furye (FTIR, 4000–400 sm^{-1}) spektroskopiyasi yordamida bioligand spektridagi 3200–3600 sm^{-1} sohada joylashgan fenol va gidroksil (–OH) guruhlariga xos keng yutilish polosasining Cu^{2+} ionlari bilan komplekslangandan so‘ng intensivligi pasayishi va quyi chastota (uzun to‘lqin) tomonga siljishini, shuningdek, karboksil (–COOH), C–O guruhlari ishtirokini hamda yangi Cu–O koordinatsion bog‘lariga xos signallar paydo bo‘lishini eksperimental tasdiqlagan [8]. Ushbu ilmiy guruhning ikkinchi nashrida — Askarov, Zhalolov va Abdugapparov (2026) ishida xuddi shu metodologik yondashuv rux (Zn^{2+}) ionlariga tatbiq etilib, biologik faol ligandlarning Zn^{2+} bilan xelatli mikroo‘g‘itlar hosil qilish istiqbollari va IQ-spektral o‘zgarishlari asoslab berilgan [9]. Mazkur ikki ish [8, 9] anor po‘stlog‘i komponentlarining Cu^{2+} va Zn^{2+} ionlari bilan oddiy mexanik aralashma emas, balki haqiqiy kimyoviy-koordinatsion bog‘ hosil qilishini isbotlovchi fundamental kimyoviy dalildir. Shu bilan birga, tanqidiy sharh nuqtayi nazaridan, kimyoviy modifikatsiyalangan bioligandda olingan ushbu natijalarni neytral suv-spirtli ekstraksiyadan qolgan shrotga avtomatik ko‘chirmaslik va IQ-spektrdagi siljishlarni (Cu–O yoki Zn–O bog‘lari hosil bo‘lishini) agronomik samaradorlikning yakuniy isboti sifatida emas, balki mikroo‘g‘it yaratishning birinchi — kimyoviy identifikatsiya bosqichi sifatida baholash lozim.

Darhaqiqat, tarkibi murakkab bo‘lgan o‘simlik biomassasida IQ-spektroskopiya ma’lumotlarini talqin qilish ehtiyotkorlikni talab etadi: polisaxaridlar, lignin va qoldiq polifenollarning yutilish polosalari bir-birining ustiga tushishi (overlapping), shuningdek, namlik darajasi yoki pH o‘zgarishi hisobiga karboksilat ionlarining protonlanish/deprotonlanish nisbati siljishi spektr ko‘rinishiga ta’sir qiladi. Shu sababli zamonaviy tadqiqotlarda spektroskopik tahlil har doim miqdoriy element tahlili (AAS, ICP-OES), rentgen fazali tahlil (XRD) hamda skanerlovchi elektron mikroskopiya va energodispersion spektroskopiya (SEM-EDS) bilan birgalikda olib boriladi [6, 30, 31]. Xususan, SEM-EDS xaritasi metallning granula sirti yoki ko‘ndalang kesimida qanday taqsimlanganini vizual ko‘rsatsa-da, u faqat mikro-nuqtaviy (lokal) ma’lumot beradi, partiyaning haqiqiy tarkibini aniqlash uchun

esa vakillik qiluvchi (reprezentativ) o‘rtacha namunani to‘liq mineralizatsiya qilib, quruq massadagi mis yoki ruxning aniq foiz ulushini o‘lchash talab etiladi. Reaktorga kiritilgan metall tuzi, qattiq fazada tutib qolingan metall, filtrat/chayindi suvlariga o‘tib ketgan ulush va keyinchalik tuproqqa ajralib chiqadigan miqdor o‘rtasida yopiq moddiy balans tuzish — har qanday yangi mikroelementli o‘g‘it texnologiyasining ajralmas shartidir.

3.6. Granulalash va kompozit matritsalarni shakllantirish: mexanik yaxlitlik hamda desorbsiya kinetikasi

Mayda dispers kukun holidagi bioxelat yoki boyitilgan shrotni qishloq xo‘jaligida qo‘llash (saqlash, transportirovka qilish, seyalkada bir tekis solish) uchun uni ma’lum geometrik va mexanik xossalarga ega bo‘lgan granula shakliga keltirish zarur. Granulalash jarayoni esa faqatgina tashqi shakl berish emas, balki ichki g‘ovaklik va diffuziya to‘siqlarini yaratish orqali modda almashinuvi tezligini boshqarish vositasidir. Ma va hammualliflar (2023) mis alginat va bio-poliuretan asosida ikki qatlamli (bilayer) qoplamaga ega bo‘lgan ko‘p funksiyali o‘g‘it yaratib, unda oziqa moddalarning sekin ajralishi, selen yetkazib berilishi va antifungitsid faollikni birlashtirgan [5]. Ushbu ish mis-alginat to‘rining o‘g‘it qoplamasidagi strukturaviy rolini tushunish uchun ajoyib namuna bo‘lsada, gidrofob poliuretan qobig‘i bilan qoplangan yadro-qobiq (core-shell) tizimining desorbsiya kinetikasini gomogen ravishda biomassa kukuni bilan to‘ldirilgan oddiy alginat yoki KMTS granulasiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirib bo‘lmaydi.

Polisaxarid va mineral-organik matritsalardan ruxning ajralish mexanizmlariga bag‘ishlangan eng so‘nggi tadqiqotlar (2024-2026) kompozit granulalarni loyihalashda qanday omillarni hisobga olish kerakligini aniq ko‘rsatib beradi. Antunes va hammualliflar (2026) rux oksidi (ZnO) nanozarrachalari hamda o‘simlik o‘sishini rag‘batlantiruvchi bakteriyalarni (PGPB) o‘z ichiga olgan gibrid alginat-ksilan gidrogel sferalarini sintez qilib, tuproq muhitida 60 kun davomida ruxning bosqichma-bosqich ajralishini kuzatgan [6]. Mohrazi va Ghasemi-Fasaei (2026) esa Box-Behnken eksperimental dizayni va RSM yordamida organik komponentlar (bioko‘mir va pektin), noorganik qatlamli qo‘sh gidroksidlar (LDH/LDO) hamda *Bacillus subtilis* inokulyatsiyasi nisbatlarini optimallashtirib, sekin ta’sir etuvchi rux o‘g‘itlarini (Zn-SRFs) yaratgan [32]. Bu ikki tadqiqotdan [6, 32] kelib chiqadigan fundamental xulosa shuki, granulaning metall bilan yuklanish darajasi (loading capacity), suvda shishish koeffitsiyenti (swelling ratio) va desorbsiya tezligi bir-biri bilan chiziqli bog‘lanmagan mustaqil javob funksiyalaridir: tarkibida metall foizi eng yuqori bo‘lgan retseptura har doim ham eng maqbul ajralish egri chizig‘ini bermaydi.

Boshqa oziqa elementlari uchun ishlab chiqilgan biopolimer granulalar tajribasi ham uslubiy jihatdan diqqatga sazovor. Lei va hammualliflar (2026) sellyuloza oligosaxaridlari bilan modifikatsiyalangan alginat/bioko‘mir kompozit gidrogellarida vodorod bog‘larining ko‘p bosqichli to‘rini hosil qilish orqali tuproqda suv tutish qobiliyatini va karbamidning sekin ajralishini yaxshilagan [33]. Hidayat va hammualliflar (2024) esa sho‘rlangan tuproqlarni melioratsiya qilish maqsadida natriy alginat-poliakril kislotasi hamda gumin kislotasi bilan kapsulalangan struvit granulalarini sinovdan o‘tkazgan [34]. Garchi ushbu tizimlar [33, 34] anor po‘stlog‘iga asoslanmagan bo‘lsada, ular qattiq to‘ldiruvchi (bioko‘mir, struvit yoki o‘simlik shroti) bilan polielektrolit bog‘lovchi (alginat, pektin, KMTS) o‘rtasidagi fazalararo ta’sirlashuv granulaning mexanik pishiqligini va diffuzion o‘tkazuvchanligini belgilashini isbotlaydi. Amaliy baholashda faqat quruq granulaning tashqi ko‘rinishi va ezilishga chidamliligini o‘lchash yetarli emas: namlanganda shishish darajasi, yuvilishdan keyin saqlanib qolgan quruq massa va kimyoviy desorbsiya parallel ravishda kuzatilishi kerak, chunki tashqi shaklini yo‘qotmagan shishgan gidrogel o‘z ichidagi eruvchan tuzning asosiy qismini allaqachon tashqi muhitga chiqarib yuborgan bo‘lishi mumkin.

3.7. Tuproq muhitidagi transformatsiya, biologik o‘zlashtirilish va fitotoksiklik xavfi

Mikroelementli o‘g‘itning haqiqiy qiymati kimyoviy reaktorda emas, balki «o‘g‘it granulasi — tuproq eritmasi — rizosfera — o‘simlik» tizimida namoyon bo‘ladi. Anor po‘stlog‘iga asoslanmagan tabiiy va mineral tashuvchilar ustida o‘tkazilgan agrobiologik tadqiqotlar yakuniy sinov bosqichini qanday tashkil etish kerakligini ko‘rsatib beradi. Masalan, Sharma va hammualliflar (2023) rux oksidi va akatsiya yelimi (Gum acacia) nanokompozitini sekin ta’sir etuvchi o‘g‘it sifatida sinab, ismaloq (*Spinacia oleracea* L.) o‘simligining biomassa to‘plashi va ruxni o‘zlashtirish ko‘rsatkichlarini o‘lchagan [7]. Cyriac va hammualliflar (2024) esa rux almashingan montmorillonit gilini (Zn-MMT) desorbsiya tajribalari va sholi (*Oryza sativa* L.) o‘simligidagi fiziologik javob orqali baholagan [31]. Ushbu ishlarning uslubiy ustunligi shundaki, ularda material sintezi bevosita o‘simlik to‘qimalaridagi element konsentratsiyasi va morfometrik o‘lchovlar bilan yakunlangan.

Distillangan suvdagi eruvchanlik yoki bufer eritmadagi desorbsiya sinovi dastlabki skrining uchun qulay bo‘lsa-da, u tuproqdagi murakkab geokimyoviy jarayonlarni to‘liq aks ettirmaydi. Khepar va hammualliflar (2024) tuproq muhitida rux sulfidi (ZnS) nanozarrachalarining adsorbsiya dinamikasi va erish kinetikasini o‘rganib, elementning biologik mavjudligi (bioaccessibility) bevosita qabul qiluvchi tuproqning pH ko‘rsatkichi, karbonatlilik darajasi, kation almashinish sig‘imi va organik modda miqdori bilan belgilanishini isbotlagan [35]. Xususan, Markaziy Osiyo va O‘zbekistonning karbonatli-ishqoriy ($pH > 7,5–8,0$) bo‘z tuproqlarida oddiy mineral tuzlar ($CuSO_4$, $ZnSO_4$) tezda erimaydigan gidroksid, karbonat va fosfatlar shakliga o‘tib fiksatsiyalanadi; anor po‘stlog‘i polifenollari va pektin kislotalari ishtirokidagi biokhelatli matritsa esa aynan shu fiksatsiyaning oldini olishda ustunlik berishi kutiladi, biroq bu gipoteza tuproq inkubatsiyasi yoki tuproq ustunlarida (soil columns) eksperimental tasdiqlanishi shart.

Yana bir jiddiy masala — mikroelementlar dozasi va ajralish tezligining fitotoksiklik chegarasi bilan bog‘liqligidir. Charoenkal va hammualliflar (2025) rux bilan boyitilgan muhandislik bioko‘mirlarining fazalararo bog‘lanish mexanizmlari va ekologik xavfini vegetatsion tajribalarda qiyoslab, ayrim modifikatsiyalarda ruxning haddan tashqari tez yoki nomutanosib chiqishi o‘simlikda fitotoksik stress keltirib chiqarishini, to‘g‘ri muhandislik ishlovi berilgan bioko‘mir esa ushbu xavfni bartaraf etib, barqaror oziqlanishni ta’minlashini aniqlagan [36]. Mis (Cu^{2+}) uchun fitotoksiklik slabi (toksiklik bo‘sag‘asi) ruxga qaraganda yanada torroq bo‘lgani sababli, tabiiy biomassadan foydalanilganining o‘zi mahsulotni avtomatik ravishda «mutlaqo beziyon» qilib qo‘ymaydi. Li va hammualliflar (2025) hamda Cheng va hammualliflar (2024) tomonidan qoplamali rux-bioko‘mir o‘g‘itlari ustida o‘tkazilgan dala va iqtisodiy baholash ishlari ko‘rsatganidek [37, 38], ko‘p komponentli granulalarda kuzatiladigan agrobiologik samara bitta elementga emas, balki butun kompozitsiya sinergiyasiga tegishlidir. Shu bois anor po‘stlog‘i qoldig‘idan olingan o‘g‘itni sinashda kamida to‘rtta variant — (1) o‘g‘itsiz mutlaq nazorat, (2) metallsiz quruq shrot/polimer matritsasi, (3) ekvivalent dozadagi oddiy eruvchan tuz ($CuSO_4$ yoki $ZnSO_4$) va (4) ishlab chiqilgan eksperimental granula o‘zaro solishtirilgandagina biopolimer matritsaning haqiqiy hissasi ilmiy jihatdan ajratib olinadi.

3.8. Ikki mahsulot oqimini yagona texnologik sxemaga integratsiyalash shartlari va mavjud cheklovlar

Yuqorida tahlil qilingan 38 ta ilmiy manbaning sintezi shuni ko‘rsatadiki, hozirgi vaqtda adabiyotlarda yaxlit «ekstrakt + mikroo‘g‘it» texnologiyasidan ko‘ra, uning alohida bo‘g‘inlari (selektiv ekstraksiya, kukunlarni quritish, metall biosorbsiyasi va gidrogel granulalash) kuchliroq eksperimental bazaga ega. Ushbu alohida bo‘g‘inlarni bitta uzluksiz texnologik sxemaga birlashtirishda asosiy ilmiy muammo — birinchi bosqich (ekstraksiya) va ikkinchi bosqich (xelatlash/granulalash) o‘rtasidagi kompromiss nuqtani topishdir. Agar ekstraksiya bosqichida o‘ta agressiv erituvchilar yoki yuqori harorat qo‘llanib, barcha polifenollar va pektin moddalari suyuq fazaga to‘liq o‘tkazilsa, qolgan qattiq sellyuloza-lignin qoldig‘i metall bog‘lash va granula hosil qilish xususiyatini deyarli yo‘qotadi. Aksincha, o‘ta yumshoq ekstraksiya rejimi quruq texnik ekstrakt unumini pasaytirib yuboradi. Demak, kompleks texnologiyada har ikkala mahsulot oqimining sifat ko‘rsatkichlari yagona xomashyo partiyasida birgalikda optimallashtirilishi talab etiladi.

2-jadval. Mikroelement tashuvchi matritsalarga oid eksperimental dalillar va anor po‘stlog‘i shroti uchun ochiq ilmiy masalalar

O‘rganilgan matritsa va adabiyot manbayi	Sharhda tayanilgan bevosita eksperimental dalil	Anor po‘stlog‘i ekstraksiya qoldig‘i (shroti) uchun tekshirilishi zarur bo‘lgan ilmiy savol
Anor po‘stlog‘i bioligandlari + Cu^{2+} / Zn^{2+} [8, 9]	Ishqoriy-oksidlovchi ishlov bilan olingan bioligandlarning Cu^{2+} va Zn^{2+} bilan koordinatsion bog‘ (Cu–O, —OH, —COOH siljishi) hosil qilishi IQ-spektrda tasdiqlangan.	Yumshoq suv-spirtli ekstraksiyadan qolgan shrotning modifikatsiyasiz va bog‘lovchilar ishtirokidagi xelatlash sig‘imi hamda desorbsiya kinetikasi qanday?
Anor po‘stlog‘idan faollashtirilgan ko‘mir [29]	Fosfat kislota bilan faollashtirilgan uglerodli sorbentda suvdan Cu^{2+} adsorbsiyasi o‘rganilgan.	Piroliz qilinmagan (karbonlashtirilmagan) lignotsellyuloza-pektinli ekstraksiya qoldig‘i mis va ruxni qanday mexanizm va sig‘imda tutib qoladi?
Natriy alginat + anor po‘stlog‘i gidrogeli [30]	Og‘ir metallarni suvdan tozalash; Cu^{2+} uchun maksimal yutilish $42{,}37 \pm 3{,}35$ mg/g ekani qayd etilgan.	Yuvilgan va quritilgan granulada metallning necha foizi saqlanib qoladi va u tuproq eritmasiga qanday tezlikda qayta ajralib chiqadi (desorbsiyalanadi)?
Mis alginat + bio-poliuretan ikki qatlamli qoplama [5]	Yadro-qobiq tuzilishli o‘g‘itda sekin ajralish va antifungitsid xususiyat namoyish etilgan.	Maxsus gidrofob poliuretan qobiqsiz, shrot bilan hajmiy to‘ldirilgan matritsaviy granulada ajralish tezligini qanday boshqarish mumkin?
Alginat-ksilan gidrogel sferalari + ZnO va PGPB [6]	Tuproqda 60 kunlik rux ajralishi va makkajo‘xori o‘sishiga ijobiy ta’siri aniqlangan.	Polifenol qoldiqlari saqlangan anor shroti tuproq mikroflorasi va o‘simlik ildiziga rux bilan birgalikda qanday ta’sir ko‘rsatadi?
Bioko‘mir + pektin + LDH/LDO + bakteriya (Zn-SRF) [32]	RSM orqali organik, mineral va mikrob omillari nisbati optimallashtirilgan.	Bitta texnologik siklda ham suyuq ekstrakt chiqishini, ham shrot asosidagi granula xossalarini birgalikda (multi-objective) optimallashtirish shartlari qanday?
Muhandislik bioko‘miri + Zn [36–38]	Interfeys mexanizmlari, dala samaradorligi, tannarx va ayrim tarkiblarda fitotoksiklik chegarasi ko‘rsatilgan.	Mahalliy tuproq tiplari uchun Cu va Zn saqlovchi po‘stloq granulalarining xavfsiz agronomik dozasi va iqtisodiy rentabelligi qanday?

Texnologik-iqtisodiy baholashda ham xuddi shunday realistik yondashuv zarur. Ikkilamchi xomashyo — anor po‘stlog‘ining boshlang‘ich narxi arzon bo‘lishiga qaramay, organik erituvchini rekuperatsiya qilish, vakuum-bug‘latish va quritish uchun sarflanadigan issiqlik/elektr energiyasi, mis va rux tuzlari, bog‘lovchi biopolimerlar, tikuvchi (cross-linking) tuz eritmalari hamda chayindi suvlarni utilizatsiya qilish xarajatlari yakuniy mahsulot tannarxini shakllantiradi. Cheng va hammualliflar (2024) qoplamali bioko‘mir o‘g‘itlarida tannarx-samaradorlik (cost-effectiveness) tahlilini o‘tkazib ko‘rsatganidek [38], yangi avlod o‘g‘iti an’anaviy mineral tuzlarga nisbatan raqobatbardosh bo‘lishi uchun uning ishlab chiqarish xarajati qo‘shimcha hosildorlik va o‘g‘it sarfining kamayishi hisobiga qoplanishi kerak.

Mazkur sharhning metodologik cheklovlari sifatida qidiruvning maqsadli xarakteri hamda tahlil qilingan manbalarda eksperimental metodikalar (erituvchi turi, gidromodul, metall konsentratsiyasi, pH, desorbsiya muhiti) bir xil standartga keltirilmagani sababli yagona statistik metatahlil o‘tkazilmaganini qayd etish lozim. Biroq aynan shu uslubiy xilma-xillik mavjud adabiyotlardagi eng asosiy ilmiy bo‘shliqni (research gap) ochib berdi: xom po‘stloq, faollashtirilgan uglerod yoki toza polisaxaridlarda olingan natijalarni ekstraksiya shrotiga mexanik ravishda ko‘chirmasdan, bitta texnologik sikl doirasida «xomashyo — quruq ekstrakt — ekstraksiya qoldig‘i — mikroelementli granula — tuproq-o‘simlik javobi» zanjirini bevosita eksperimental tadqiq etish zarur.

4. Xulosa

1. Anor (*Punica granatum* L.) po‘stlog‘ini kompleks qayta ishlash orqali bir vaqtning o‘zida ikkita maqsadli mahsulot — suvda eruvchan polifenolli quruq ekstrakt hamda qattiq qoldiq (shrot) asosida Cu va Zn saqlovchi mikroelementli o‘g‘itlar olish ilmiy va resurs tejamkorligi jihatidan to‘liq asoslangan yo‘nalishdir. Biroq mavjud adabiyotlarda ushbu ikki bosqich asosan alohida-alohida o‘rganilgan bo‘lib, turli xomashyo partiyalari va turli sharoitlarda olingan unumlarni mexanik ravishda umumlashtirib bo‘lmaydi.

2. Ekstraksiya bosqichida tanlangan rejim (erituvchi qutbliligi, harorat va intensivlashtirish usuli) nafaqat olinadigan ekstraktning tovar va biologik xossalarini, balki ikkinchi bosqichga o‘tadigan qattiq shrotning strukturaviy karkasi, g‘ovakliligi hamda metall bog‘lovchi funksional guruhlari (–OH, –COOH) zaxirasini ham bevosita belgilaydi. Shu sababli kompleks texnologiyada ikkala mahsulot oqimi yagona moddiy balans doirasida birgalikda baholanishi shart.

3. Mintaqaviy va xalqaro tadqiqotlarda anor po‘stlog‘i bioligandlari va kompozitlarining Cu^{2+} hamda Zn^{2+} ionlari bilan koordinatsion bog‘lanish hosil qilishi (IQ-spektrdagi siljishlar, Cu–O bog‘lari va sorbsion sig‘im) ishonchli tasdiqlangan [8, 9, 29, 30]. Shunga qaramay, spektroskopik ta’sirlashuv yoki suvdan adsorbsiya ko‘rsatkichi tayyor o‘g‘itning agronomik samaradorligiga teng emas: haqiqiy mikroo‘g‘it sifatida e’tirof etish uchun granuladagi miqdoriy metall balansi, mexanik pishiqlik, tuproq muhitidagi boshqariluvchan desorbsiya kinetikasi hamda tegishli nazorat variantlari bilan solishtirilgan o‘simlik javobi eksperimental tasdiqlanishi lozim.

Ma’lumotlarning mavjudligi (Data Availability Statement)

Tahlil qilingan barcha ilmiy dalillar foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidagi ochiq va indekslangan nashrlarda mavjud.

Manfaatlar to‘qnashuvi (Conflict of Interest)

Mualliflar mazkur maqolani tayyorlash va nashr etishda hech qanday moliyaviy yoki shaxsiy manfaatlar to‘qnashuvi mavjud emasligini ma’lum qiladilar.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

[1] Feng Y, Lin J, He G, Liang L, Liu Q, Yan J, et al. Compositions and Biological Activities of Pomegranate Peel Polyphenols Extracted by Different Solvents. Molecules. 2022;27(15):4796. https://doi.org/10.3390/molecules27154796

[2] Yang B, Kealey K, Chen J, Mis Solval K. Developing microencapsulated powders containing polyphenols and pectin extracted from Georgia-grown pomegranate peels. LWT. 2022;154:112644. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112644

[3] Podetti C, Riveros-Gomez M, Román MC, Zalazar-García D, Fabani MP, Mazza G, et al. Polyphenol-Enriched Pectin from Pomegranate Peel: Multi-Objective Optimization of the Eco-Friendly Extraction Process. Molecules. 2023;28(22):7656. https://doi.org/10.3390/molecules28227656

[4] Siddiqui VU, Almehjani TM, Sapuan SM, Jamal T, Ilyas RA, Eldin SM, et al. Isolation and Characterization of Cellulose from Pomegranate (Punica granatum) Peel. Journal of Natural Fibers. 2024;21(1):2299943. https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2299943

[5] Ma X, Zhang S, Yang Y, Tong Z, Shen T, Yu Z, et al. Development of multifunctional copper alginate and bio-polyurethane bilayer coated fertilizer: Controlled-release, selenium supply and antifungal. International Journal of Biological Macromolecules. 2023;224:256-265. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.121

[6] Antunes DR, Forini MMLH, de Lima PHC, Biscalchim ÉR, Cavalcante LAF, Brienzo M, et al. Sustainable hybrid alginate-based hydrogels for dual controlled release of micronutrients and plant growth-promoting bacteria in soil. International Journal of Biological Macromolecules. 2026;355:151216. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.151216

[7] Sharma A, Kumar S, Singh R. Formulation of Zinc oxide/Gum acacia nanocomposite as a novel slow-release fertilizer for enhancing Zn uptake and growth performance of Spinacia oleracea L. Plant Physiology and Biochemistry. 2023;201:107884. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107884

[8] Jalolov JM, Asqarov IR, Abdugapparov FS. Preparation of bio-ligands from pomegranate (Punica granatum L.) peel and their application in the synthesis of Cu and Zn complex micronutrient fertilizers. Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine (Tovarlar kimyosi va xalq tabobati). 2026;5(2):111-129. https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss2.2026.643

[9] Askarov IR, Zhalolov JM, Abdugapparov FS. Perspektivy sozdaniya kompleksnykh mikroelementnykh udobreniy na osnove biologicheski aktivnykh ligandov Zn^{2+} [Prospects for the creation of complex microelement fertilizers based on biologically active Zn^{2+} ligands] // Аскаров И.Р., Жалолов Ж.М., Абдугаппаров Ф.С. Перспективы создания комплексных микроэлементных удобрений на основе биологически активных лигандов Zn^{2+}. Universum: химия и биология (Universum: Chemistry and Biology). 2026;6(144):19-27. https://doi.org/10.32743/UniChem.2026.144.6.22863 (URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/22863)

[10] Cano-Lamadrid M, Martínez-Zamora L, Castillejo N, Bueso MC, Kessler M, Artés-Hernández F. Ultrasound-assisted ethanolic extraction of punicalagin from pomegranate by-products influenced by cultivar, pre-drying treatment, particle size, and temperature. LWT. 2023;186:115236. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115236

[11] Wu J, Wang X, Jiang R, Zhang G, Dang Y. Effects of drying methods on the active ingredient content and biological activities of pomegranate peels: An investigation of the potential mechanism of polyphenols as antifungal agents. Food Bioscience. 2025;64:105947. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.105947

[12] Kupnik K, Leitgeb M, Primožič M, Postružnik V, Kotnik P, Kučuk N, et al. Supercritical Fluid and Conventional Extractions of High Value-Added Compounds from Pomegranate Peels Waste: Production, Quantification and Antimicrobial Activity of Bioactive Constituents. Plants. 2022;11(7):928. https://doi.org/10.3390/plants11070928

[13] Andishmand H, Masoumi B, Torbati M, Homayouni-Rad A, Azadmard-Damirchi S, Hamishehkar H. Ultrasonication/dynamic maceration-assisted extraction method as a novel combined approach for recovery of phenolic compounds from pomegranate peel. Food Science & Nutrition. 2023;11(11):7160-7171. https://doi.org/10.1002/fsn3.3642

[14] Patil N, Yadav P, Gogate PR. Ultrasound assisted intensified enzymatic extraction of total phenolic compounds from pomegranate peels. Separation and Purification Technology. 2024;350:127967. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127967

[15] Yu K, Huang X, Yu Z, Chen C, Li P, Wu D, et al. Application of steam explosion pretreatment for accelerating the phenolics extraction from pomegranate peel: Mechanism and modeling. Journal of Food Engineering. 2023;357:111629. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111629

[16] Kim HJ, Yoon KY. Optimization of ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction of bioactive compounds from pomegranate peel using response surface methodology. Food Science and Biotechnology. 2023;32(13):1851-1860. https://doi.org/10.1007/s10068-023-01298-x

[17] Liu JZ, Lu XX, Yang XT, Jiang LJ, Cui Q. An efficient approach for the extraction of polyphenols from pomegranate peel using the green solvent and profiling by UPLC-Q-TOF-MS/MS analysis. Microchemical Journal. 2024;205:111421. https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111421

[18] Singh N, Patle DS, Kumar S. Microwave- and Ultrasonication-Based Intensified and Synergetic Approaches for Extraction of Bioactive Compounds from Pomegranate Peels: Parametric and Kinetic Studies. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2024;63(20):9214-9224. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00661

[19] Singh N, Kumar S, Patle DS. Intensification of extraction of bioactive compounds from pomegranate peel using an ultrasound-microwave assisted extraction approach: Parametric optimization, kinetics and thermodynamics. Separation and Purification Technology. 2025;359(Pt 2):130681. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130681

[20] Vafajoo A, Sabahi H, Nejad Ebrahimi S, Ahmadikia K. Optimization of biomimetic fermentation technique for enhanced and eco-friendly extraction of phenolics from pomegranate peel. Bioresource Technology Reports. 2024;28:101986. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101986

[21] Aydin M, Tontul I, Turker S. Innovative approach for phenolic extract production from pomegranate by-products: Enzymatic liquefaction and ultrafiltration. Food Bioscience. 2025;64:105801. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105801

[22] Hadree J, Shahidi F, Mohebbi M, Abbaspour M. Evaluation of Effects of Spray Drying Conditions on Physicochemical Properties of Pomegranate Juice Powder Enriched with Pomegranate Peel Phenolic Compounds: Modeling and Optimization by RSM. Foods. 2023;12(10):2066. https://doi.org/10.3390/foods12102066

[23] Yang B, Chen J, Mis Solval K. Microencapsulated polyphenol extracts from Georgia-grown pomegranate peels delay lipid oxidation in salad dressing during accelerated and ambient storage conditions. Food Science & Nutrition. 2024;12(1):370-384. https://doi.org/10.1002/fsn3.3776

[24] Zhang ZH, Li X, Ma A, Gao X, Zhu S, Li B. Characteristics of pomegranate (Punica granatum L.) peel polyphenols encapsulated with whey protein isolate and β-cyclodextrin by spray-drying. International Journal of Biological Macromolecules. 2024;278(Pt 4):135279. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135279

[25] Zhang ZH, Wang H, Han X, Huang X, Zeng Q, Li X, et al. The effect of different wall materials on the physicochemical properties and antioxidant activity of pomegranate peel polyphenols (PPP) microcapsules. International Journal of Biological Macromolecules. 2025;298:139958. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139958

[26] Chezanoglou E, Kenanidou N, Spyropoulos C, Xenitopoulou D, Zlati E, Goula AM. Encapsulation of pomegranate peel extract in sucrose matrix by co-crystallization. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2023;31:100949. https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100949

[27] Rashid R, Masoodi FA, Wani SM, Manzoor S, Gull A. Ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from pomegranate peel, their nanoencapsulation and application for improvement in shelf life extension of edible oils. Food Chemistry. 2022;385:132608. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132608

[28] El Fihry N, El Mabrouk K, Eeckhout M, Schols HA, Hajjaj H. Physicochemical, structural, and functional characterization of pectin extracted from quince and pomegranate peel: A comparative study. International Journal of Biological Macromolecules. 2024;256(Pt 2):127957. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127957

[29] Saadi W, Souissi-Najar S, Othman M, Ouederni A. Copper adsorption onto pomegranate peel activated carbon as a new adsorbent. Cellulose Chemistry and Technology. 2023;57(5-6):657-669. https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2023.57.60

[30] Lalchand P, Thavarajah N, Fernando X. Sodium Alginate-Pomegranate Peel Hydrogels for the Remediation of Heavy Metals from Water. Technologies. 2025;13(8):351. https://doi.org/10.3390/technologies13080351

[31] Cyriac J, Sreejit CM, Yuvaraj M, Joseph S, Sathya Priya R, Saju F, et al. Zinc-exchanged montmorillonite clay: A promising slow-release nanofertilizer for rice (Oryza sativa L.). Plant Physiology and Biochemistry. 2024;212:108790. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108790

[32] Mohrazi A, Ghasemi-Fasaei R. Optimization of synthesis constituents of slow-release zinc fertilizers using response surface methodology. PLOS One. 2026;21(4):e0345863. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0345863

[33] Lei Y, Feng C, Cai J, Jin C, Yang J, Huang J, et al. Oligosaccharide modified alginate/biochar composites hydrogel to fabricate slow-release fertilizer. International Journal of Biological Macromolecules. 2026;369:152815. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.152815

[34] Hidayat E, Sarbani NMM, Samitsu S, Nugroho FAA, Lahiri SK, Aoyagi M, et al. Evaluation of slow-release fertilizers derived from hydrogel beads: Sodium alginate-poly (acrylic acid) and humic acid-encapsulated struvite for soil salinity amelioration. Arabian Journal of Chemistry. 2024;17(9):105877. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105877

[35] Khepar V, Sidhu A, Chandel S. Sustained release of Zn from zinc sulfide nanoparticles (ZnS NPs) amplified the bioaccessibility of Zn in soil: Adsorption dynamics and dissolution kinetics. Environmental Research. 2024;251(Pt 1):118624. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118624

[36] Charoenkal K, Yang Z, Wang Z, Sun X, Li Q, Lin S, et al. Engineered Zn-enriched biochars for controlled nutrient delivery: Elucidating interfacial mechanisms and mitigating environmental risk. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025;13(6):119606. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119606

[37] Li M, Zhao X, Cheng Y, Wu M, Dong C, Xiang H, et al. Zinc oxide nanoparticles coupled biochar-based slow-release fertilizer for enhanced nutrient efficiency and sustainable agriculture. Industrial Crops and Products. 2025;232:121265. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121265

[38] Cheng Y, Wu M, Lu J, Zhang Y, Lu R, Li Y, et al. Optimizing fabrication of coated fertilizers integrated with biochar for enhanced slow-release properties: Mechanisms and cost-effectiveness analysis. Industrial Crops and Products. 2024;222(Pt 5):120077. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120077