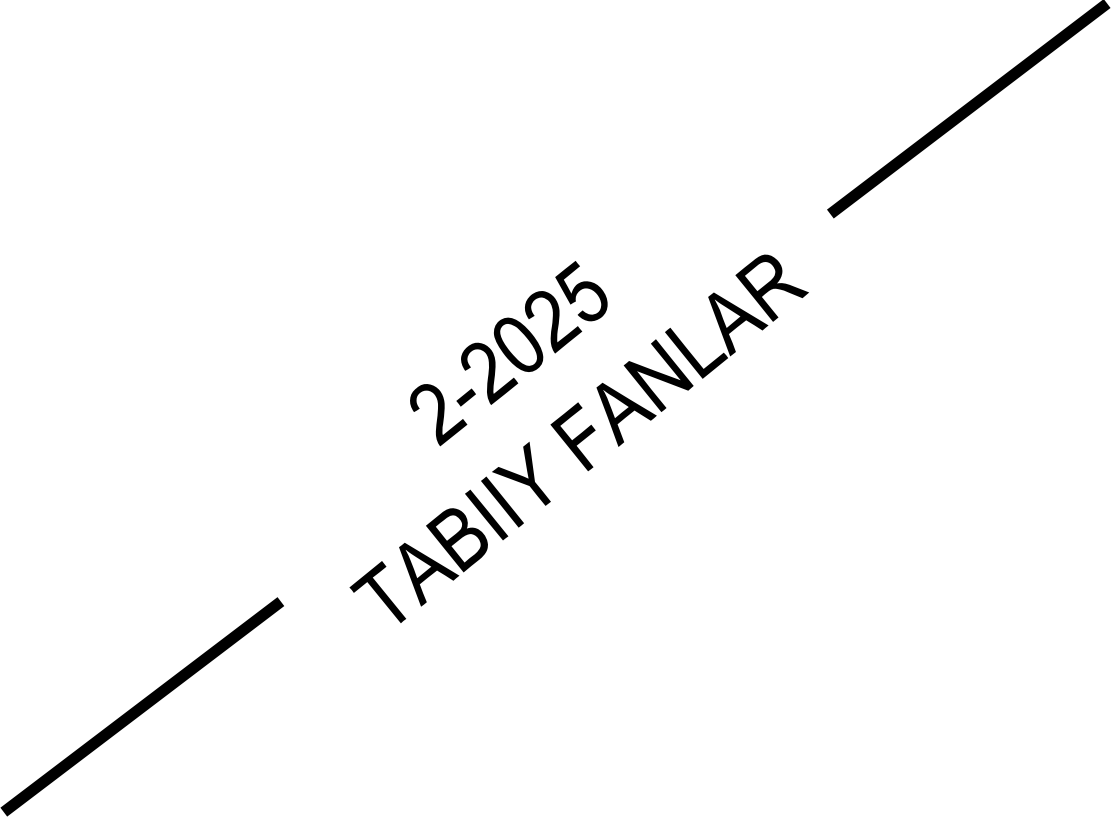


O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIIY TA'LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

FARG'ONA DAVLAT UNIVERSITETI

**FarDU.
ILMIY
XABARLAR**

1995-yildan nashr etiladi
Yilda 6 marta chiqadi



**2-2025
TABIIY FANLAR**

**НАУЧНЫЙ
ВЕСТНИК.
ФерГУ**

Издаётся с 1995 года
Выходит 6 раз в год

I.R.Asqarov, O.Sh.Abdulloev, Q.Q.Otaxonov, Z.N.Razzaqov Analysis of the content of water-soluble vitamins in the food supplement AS-RAZZOQ	6
S.M.Ikramova, D.N.Shaxidova, H.G'.Qurbonov, D.A.Gafurova Nikel ionlarini sorbsiyalash uchun yangi ion almashuvchi materialning ishlatilishi	12
N.M.Qoraboyeva, D.A.Gafurova, B.T.Orziqulov, H.G'.Qurbonov Polikompleksonning olinishi va fizik-kimyoviy xossalari	18
M.A.Axmadaliyev, N.M.Yakubova, I.R.Xasanboyev α, β –To'yinmagan ketonlarni olish	25
A.X.Xaydarov, O.M.Nazarov, X.N.Saminov Olma o'simligi barglari efir moylarining kimyoviy tarkibini o'rganish	30
M.N.Po'latova, S.Y.Xushvaqto'v, D.J.Bekchanov, Tarkibida amino va karboksil guruh tutgan polikompleksonlarning olinishi va xossalar (sharhiy maqola)	36
D.A.Eshkursunov, A.Inxonova, D.J.Bekchanov, M.G.Muxamediyev Magnit xossali polimer nanokompoziti yordamida farmatsevtika chiqindi suvlaridagi paratsetamolning fotokatalitik degradatsiyasi	43
Y.S.Fayzullayev, D.J.Bekchanov, M.G.Muxamediyev, M.R.Murtozaqulov, X.U.Usmonova Tarkibida amino va fosfon guruh saqlagan yangi avlod ion almashuvchi material olish	53
V.U.Xo'jayev S.S.Omonova O'zbekistonda keng tarqalgan <i>Heliotropium</i> turkumiga mansub ba'zi o'simliklarning element tarkibini tadqiq qilish	56
SH.A.Mamajonov, N.B.Odilxo'jazoda, S.S.G'ulomova <i>Liridendron tulipifera</i> L. o'simligining alkaloid tarkibini o'rganish	63
D.G'.Urmonov, M.M.Axadjonov <i>Limonium otolepis</i> ildiz po'stlog'idagi kondensirlangan tanninlarning miqdoriy va spektroskopik tahlili	66
N.M.Yuldasheva, B.J.Komilov K.A.Eshbakova, SH.A.Sulaymonov, B.D.Mamarasulov <i>Inula rhizocephala</i> gul qismi efir moyining kimyoviy tarkibi va mikroblarga qarshi faolligi	70
A.M.No'monov, S.R.Mirsalimova, A.B.Abdikamalova, D.A.Ergashev Log'on bentonitini boyitish va uni modifikatsiyalab olingan organobentonitlarni skanerlovchi elektron mikroskop yordamida tahlil qilish	76
M.Sh.Muxtorova, V.U.Xo'jayev, U.V.Muqimjonova <i>Lonicera nummularifolia</i> o'simligi bargi, ildizi va poyasi tarkibidagi aminokislotalar tahlili	83
Z.M.Chalaboyeva, M.J.Jalilov, S.R.Razzoqova, Sh.A.Kadirova, Sh.Sh.Turg'unboyev N-(1h-1,2,4-triazol-II) asetamidni rux (II) xlorid bilan kompleks birikmasining sintezi va tadqiqoti ..	88
D.A.Eshkursunov, I.I.Abduljalilov, D.J.Bekchanov, A.T.Xasanov Ppe-1/Nio nanozarrachalari orqali asetamidrid (pestitsid)ning fotokatalitik parchalanishi	94
I.R.Askarov, Ch.S.Abdujabborova Analysis of the biological activity of the food additive "As lupinus"	100
X.X.Usmonova, M.G.Muxamediev AN-31 Anion almashuvchi materialga Cu(II) ionlari sorbsiyasi	104
I.I.Abduljalilov, D.A.Eshkursunov, D.J.Bekchanov, M.G.Muxamediyev Metal oksid zarrachalarini saqlagan funksional polimer kompleksining olinishi va uning spektroskopik tahlili	109
I.R.Askarov, M.M.Khojimatov, D.S.Khojimatova Methods for determining the acute poisoning and cumulative properties of a natural remedy "As-Sultan"	115
F.X.Bo'riyev, E.M.Ziyadullayev, G.Q.Otamuxamedova, F.Z.Qo'shboqov, O.E.Ziyadullayev Atsetilen spirtlarining oksidlanish jarayonlariga katalizatorlar ta'siri	120

M.A.Masodikova, G.M.Zokirova, I.I.Zokirov First recorded geographical distribution and biology of <i>Euproctis chrysorrhoea</i> (Lepidoptera: Erebiidae) in the Fergana valley, Uzbekistan	127
---	-----



UO'K: 628.168+544.526.5+678.742+546.56/.58+615.2

**MAGNIT XOSSALI POLIMER NANOKOMPOZITI YORDAMIDA FARMATSEVTIKA
CHIQINDI SUVLARIDAGI PARATSETAMOLNING FOTOKATALITIK DEGRADASIYASI****ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ПАРАЦЕТАМОЛА В
ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ СТОЧНЫХ ВОДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНОГО
ПОЛИМЕРНОГО НАНОКОМПОЗИТА****PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF PARACETAMOL IN PHARMACEUTICAL
WASTEWATER USING MAGNETIC POLYMER NANOCOMPOSITE****Eshtursunov Davron Abdisamatovich¹** ¹Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston milliy universiteti, Kimyo fakulteti polimerlar kimyosi kafedrasida tayanch doktoranti**Inxonova Arofat²** ²"Alfraganus university" nodavlat oliy ta'lim tashkiloti, Farmatsevtika va kimyo kafedrasida, PhD**Bekchanov Davronbek Jumazarovich³** ³Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston milliy universiteti, Kimyo fakulteti polimerlar kimyosi kafedrasida k.f.d., prof.**Muxamediyev Muxtarjan Ganiyevich⁴** ⁴Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston milliy universiteti, Kimyo fakulteti polimerlar kimyosi kafedrasida k.f.d., prof.**Annotatsiya**

Ushbu ishda magnit xossalari polimer nanokompoziti yordamida farmatsevtika chiqindi suvlaridagi parasetamolning fotokatalitik degradatsiyasi o'rganildi. Parasetamolning N-asetil-p-benzokinonimin (NAPQI) metabolitiga transformatsiyasi va uning toksik mahsulotlari (p-benzoxinon va gidroksilli birikmalar) suv ekotizimlarida oksidlovchi stress va bioakkumulyatsiya xavfini oshirishi aniqlandi. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ UB nurlanishi ($\lambda=365$ nm) ostida 160 daqiqada parasetamolni $85\pm5\%$ samaradorlik bilan parchaladi, magnit xususiyatlari esa 5 sikldan keyin ham 90% faollikni saqlab qoldi. Tadqiqot chiqindi suvlarni barqaror tozalashda yangi yondashuvni taklif qilib, O'zbekistonning "Yashil iqtisodiyot" strategiyasi asosida quyosh resurslaridan foydalanish imkoniyatini ko'rsatadi.

Аннотация

В работе исследована фотокаталитическая деградация парацетамола в фармацевтических сточных водах с использованием магнитного полимерного наноконкомпозита. Установлено, что трансформация парацетамола в метаболит N-ацетил-п-бензохинонимин (NAPQI) и его токсичные продукты (п-бензохинон и гидроксильные соединения) усиливают окислительный стресс и риск биоаккумуляции в водных экосистемах. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ под УФ-излучением ($\lambda=365$ nm) за 160 минут разлагает парацетамол с эффективностью $85\pm5\%$, сохраняя 90% активности после 5 циклов благодаря магнитным свойствам. Исследование предлагает новый подход к устойчивой очистке сточных вод и демонстрирует потенциал использования солнечных ресурсов в соответствии со стратегией «Зеленой Экономики» Узбекистана.

Abstract

This study uses a magnetic polymer nanocomposite to examine the photocatalytic degradation of paracetamol in pharmaceutical wastewater. The transformation of paracetamol into its toxic metabolite N-acetyl-p-benzoquinone imine (NAPQI) and subsequent products (e.g., p-benzoquinone and hydroxylated compounds) was found to elevate oxidative stress and bioaccumulation risks in aquatic ecosystems. Under UV irradiation ($\lambda=365$ nm), $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ degraded paracetamol with $85\pm5\%$ efficiency within 160 minutes, retaining 90% activity after 5 cycles due to its magnetic recyclability. The study proposes a new approach to sustainable wastewater treatment and demonstrates the potential of using solar resources in line with Uzbekistan's "Green Economy" strategy.

Kalit so'zlar: Parasetamol, NAPQI, fotokataliz, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$, magnit nanokompozit, chiqindi suv, ekologik xavf.
Ключевые слова: Парацетамол, NAPQI, фотокатализ, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$, магнитный нанокomпозит, сточные воды, экологический риск.

Key words: Paracetamol, NAPQI, photocatalysis, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$, magnetic nanocomposite, wastewater, ecological risk.

KIRISH

Farmatsevtika sanoati faol farmatsevtik ingredientlar va ularning metabolitlari bilan ifloslangan katta hajmdagi oqava suvlarni hosil qiladi(1). Ushbu chiqindilar atrof-muhit va jamoat salomatligi uchun jiddiy xavf tug'diradi, chunki ular yuqori darajada barqaror, toksik va bioakkumulyatsiyaga moyil moddalardan iborat(2). Jahon banki ma'lumotlariga ko'ra, global farmatsevtika sanoati har yili taxminan 300 milliard litr oqava suv ishlab chiqaradi, undagi organik birikmalarning konsentratsiyasi 10–100 mg/L gacha yetishi mumkin.

Jahon hamjamiyati va O'zbekistonda ushbu ekologik muammolarni hal qilishga qaratilgan sa'y-harakatlar davom etmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2025-yil 30-yanvardagi PF-16-sonli farmoni asosida qabul qilingan "O'zbekiston — 2030" strategiyasida "Atrof-muhitni asrash va "yashil iqtisodiyot" yilida sanoat chiqindi suvlarining kamida 50 foizini qayta ishlash maqsadi belgilangan(3).

O'zbekistonning yillik quyosh radiatsiyasi 1600–1800 kW·soat/m² ni tashkil etadi, bu esa chiqindi suvlarni fotokatalitik usulda tozalash uchun qulay sharoitni yaratadi. An'anaviy fotokatalizatorlar, masalan, TiO_2 ($E_g \sim 3.2$ eV) va ZnO ($E_g \sim 3.3$ eV) asosidagi noorganik materiallar, farmatsevtika korxonalarining oqava suvlaridagi dori vositalari va ularning metabolitlarini samarali parchalash xususiyatiga ega. Biroq, ushbu materiallarning qayta ishlash imkoniyatlari cheklanganligi sababli, polimer asosidagi nanokompozitlar istiqbolli alternativ texnologiya sifatida o'rganilmoqda.

Funksional polimer asosidagi magnit nanokompozitlarning eng ko'p qo'llaniladigan sohalaridan biri bu atrof-muhitni muhofaza qilish, xususan, suvni tozalash jarayonlarida. Ularning magnit xossalari tashqi magnit maydonlari yordamida materialni oqava suvdan oson ajratib olish va materialni qayta tiklash imkonini beradi, funksional polimer matritsasi esa ularning bo'yoqlar, og'ir metallar va organik ifloslantiruvchi moddalar kabi suvni ifloslantiruvchi moddalar bilan o'zaro ta'sirini kuchaytiradi.

Mazkur tadqiqot doirasida magnit xossaga ega bo'lgan, sirtida temir oksid (Fe_3O_4) nanozarrachalarini saqlagan **funksional polimer materiallar** (FPM) sintez qilindi(4). Ularning "Цитрамон П" analgetik dori vositasi chiqindi suvlaridagi parasetamol (atsetaminofen) va uning metabolitlarini ultrabinafsha (UV) hamda ko'rinadigan yorug'lik nuri ostida parchalashga ta'siri o'rganildi. FPM yuzasidagi Fe_3O_4 ning magnit xususiyatlari organik ifloslantiruvchilarni yo'qotish, FPMni qayta qo'llash va chiqindi suvlarni samarali qayta ishlash imkonini beradi.

ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

Polimer materiallar o'zining chidamliligi, massasining yengilligi va ishlov berishning osonligi tufayli keng qo'llaniladi. Ishlatiladigan plastmassa sohasining 2/3 qismini polivixlorid va uning modifikatsiyalangan birikmalari tashkil qiladi(5). Ushbu polimer birikmalar qimmatbaho xususiyatlari, yuqori kimyoviy barqarorligi, arzonligi tufayli eng keng qo'llaniladigan termoplastik polimerlardandir(6–8). PVX issiqlikka beqaror bo'lib, $T < 200$ °C da destruksiyaga uchrashni boshlaydi(9), polimerning degidroxlorlanishi natijasida uzun poliyeen zanjirlar hosil bo'ladi(10). PVXni modifikatsiyalash polimerning past haroratlarda parchalanishini kamaytirishga va barqaror materiallar ishlab chiqarishda samarali ekanligi aniqlandi(11,12). Modifikatsiyalangan polimerga Me^{n+} ionlari tuzlarini kiritib, polimer matritsasi qaytaruvchi sifatida metall va metall oksidi nanozarrachalarini hosil qilishi orqali yaxshilangan fizik-kimyoviy xususiyatli va keng qo'llanilish sohasiga ega bo'lgan funksional polimer nanokompozitlarni hosil qiladi(13–15).

So'nggi yillarda nanozarrachalar nanometr shkalasidagi g'ayrioddiy xossalari tufayli ilmiy tadqiqotlar markaziga aylandi. Bu xususiyatlar ularni energetika, kataliz, fotonika, elektronika va biotibbiyot kabi sohalarida qo'llash imkonini beradi(16–18). Ularning suvni tozalash va atrof-muhitni muhofaza qilish sohasidagi yutuqlari ayniqsa ahamiyatlidir(19–21), bunda odatiy metall oksidi birikmalarining hajmiga nisbatan nanozarrachalarning yuqori sirt maydoni tufayli ifloslantiruvchi

KIMYO

moddalarini samarali katalitik parchalanishini ta'minlaydi(22). Metall oksidi tutgan funksional polimer materiallar (FPM) ishlab chiqarishda, atrof muhitga zahariligi kam tamoyillarini qo'llash, xavfli chiqindilarni minimallashtirishga va xavfli kimyoviy moddalardan foydalanishni kamaytirishga yordam beradi, bu esa ekologik barqarorlikni oshirishga olib keladi(23,24).

Parasetamol (asetaminofen) dunyoda eng keng tarqalgan analgetik va antipiretik dori vositalaridan biri sifatida tanilgan. U odatda og'riqni yo'qotish va isitmani tushirish uchun ishlatiladi. Parasetamol (N-(4-gidroksifenil)atsetamid, $C_8H_9NO_2$, molekulyar og'irligi 151,16 g/mol) aromatik benzol halqasidan iborat bo'lib, unda para holatda joylashgan gidroksil guruhi (-OH) va atsetamid guruhi (-NHCOCH₃) mavjud. Uning suvda eruvchanligi 20°C da 14 g/L, 37°C da 21 g/L ni tashkil qiladi va UV-Vis spektrida ~243 nm da kuchli yutilish sohasiga ega bo'lib, bu esa fotokimyoviy reaksiyalarni tezlashtiradi. Parasetamolning oktanol/suv bo'linish koeffitsiyenti (log Kow) 0,46 ni tashkil qiladi, bu uning lipofilik darajasining pastligini va bioakkumulyatsiyaga moyilligining kamligini ko'rsatadi, ya'ni modda organizmda to'planishga moyil emas(25). Shu bilan birga, uning pH muhitiga bog'liq bo'lgan dissotsilanish konstantasi (pKa) 9,38 ga teng bo'lib, chiqindi suvning odatiy pH diapazonida (5–8) parasetamol neytral molekula sifatida saqlanadi, bu esa uning barqarorligini ta'minlaydi va suv muhitida harakatlanishini osonlashtiradi. Parasetamol neytral sharoitda barqaror bo'lsa-da, UB nurlari orqali oksidativ stress (*ya'ni bu suvdagi organik birikmalarni reaktiv kislorod turlari (ROS) yoki erkin radikallar (superoksid anioni (O_2^-), vodorod peroksid (H_2O_2) va gidroksil radikali ($OH\cdot$)) va antioksidantlar o'rtasidagi muvozanat tufayli yuzaga keladigan jarayon*) yoki katalitik ta'sir ostida parchalanish xususiyatiga ega.

Parasetamol(asetaminofen) suv muhitida UB nurlari yoki katalitik ta'sir ostida oksidlanib, kimyoviy transformatsiyaga uchraganda uning asosiy metaboliti bo'lgan – N-asetil-p-benzoxinonimin (NAPQI) ga aylanadi(26). NAPQI fotokimyoviy jarayonlar (masalan, UB nurlanishi) yoki oksidlovchi moddalar ta'sirida hosil bo'lib, gidroliz natijasida p-benzoxinon va boshqa aromatik birikmalar kabi birlamchi mahsulotlarga parchalanadi(27). NAPQI ning elektrofil xususiyati uning suvda nukleofil moddalar (masalan, tiol guruhlar) bilan tez reaksiyaga kirishishini ta'minlaydi, bu esa oksidlovchi stress va hujayra shikastlanishiga sabab bo'ladi(28). Nunes *Aquatic Toxicology* jurnalida NAPQI ning 1-5 µg/L konsentratsiyada baliqlarning antioksidant tizimlarini zaiflashtirishini qayd etgan, bu uning toksik ta'sirini tasdiqlaydi(29).

NAPQI ning suvli eritmalaridagi transformatsiyasi gidroliz va oksidlanish jarayonlari orqali sodir bo'lib, p-benzoxinon va gidroksidlangan birikmalar (masalan, 4-aminofenol) hosil qiladi. Ushbu mahsulotlar yuqori toksiklikka ega bo'lib, suv organizmlarida bioakkumulyatsiya va mikroorganizmlarda antibiotik rezistentlikni kuchaytirish xavfini oshiradi(1,30,31). Shojaliyev ta'kidlaganidek, "NAPQI ning qisqa yarim umr muddati uning xavfini kamaytirmaydi, chunki uning mahsulotlari ham ekologik muvozanat uchun tahdid hisoblanadi." Shu sababli, samarali fotokatalitik materiallar yordamida, chiqindi suvlardagi organik ifloslantiruvchilarni konsentratsiyasini kamaytirish muhim ilmiy-texnologik yo'nalish hisoblanadi.

Ushbu tadqiqotda biz funksional polimer magnit nanokompozitlari(32) yordamida farmasevtika oqava suvlaridagi parasetamol va uning metabolitlarini fotokatalitik parchalanishiga e'tibor qaratdik. Ushbu tadqiqot yo'nalishi hozirda mavjud usullarning cheklovlarini hisobga olgan holda, masalan, dori vositalarining muayyan turiga nisbatan selektivlik nuqtai nazaridan juda muhim bo'lib, bu hozirda mavjud fotokatalitik parchalanishning samarali usullarini ishlab chiqishni talab etadi.

TADQIQOT METADOLOGIYASI

Materiallar va tadqiqot metodlari

PPE-1 anion almashuvchi materialning sintezi

Ushbu tadqiqotda foydalanilgan funksional polimer PPE-1 anion almashuvchi material polivinilxlorid (PVX) asosida polietilenpoliamin (PEPA) bilan modifikatsiya qilish yo'li bilan sintez qilindi.

Sintez uchun granulalangan PVX (o'rtacha molekulyar massa 60,000–80,000 g/mol, "NAVOIAZOT" OAJ, Navoiy, O'zbekiston) ishlatildi. 5,0 g PVX granulalari (dastlabki o'lchami 1–3 mm) 100 ml hajmli tubi yumaloq kolbada 8:2 (v/v) nisbatda etil asetat (99,5% toza, $T_{qayn}=350$ K, $n_D^{20}=1.3720$) va etanol (96%) aralashmasida ekstraksiya qilindi. Jarayon 5 soat davomida 350 K haroratda olib borilib, plastifikator (dialkil ftalatlar) va qo'shimchalarning 35 % massasi olib

tashlanadi(33). Ekstraksiya natijasida PVX granulari bo'lib, poralari ochiladi, o'lchami 0,5–2,5 mm gacha qisqaradi. Tozalangan PVX Bruxner voronkasi yordamida filtrlanib, 298 K da 2 soat havosiz sharoitida quritildi.

Tozalangan PVX namunasi 100 ml kolbaga qayta joylashtirildi va 10,0 ml PEPA (TS 2413-010-75678843-2012, azot miqdori 32–34%, "Sigma-Aldrich") qo'shiladi. Aralashma magnit aralashtirgichda (IKA RH Basic) 300 rpm tezlikda 373 K haroratda 4,0 soat davomida qizdirildi. Ushbu bosqichda PVXning C–Cl bog'lari PEPAning amin guruhlar bilan nukleofil almashinish reaksiyasiga kirishdi, bu IQ spektroskopiyada (Shimadzu IRTracer-100) 660 cm^{-1} da C–Cl tebranishlarining intensivligi pasayishi bilan tasdiqlandi. Reaksiya mahsuloti 10 mkm filtr qog'ozi yordamida filtrlandi.

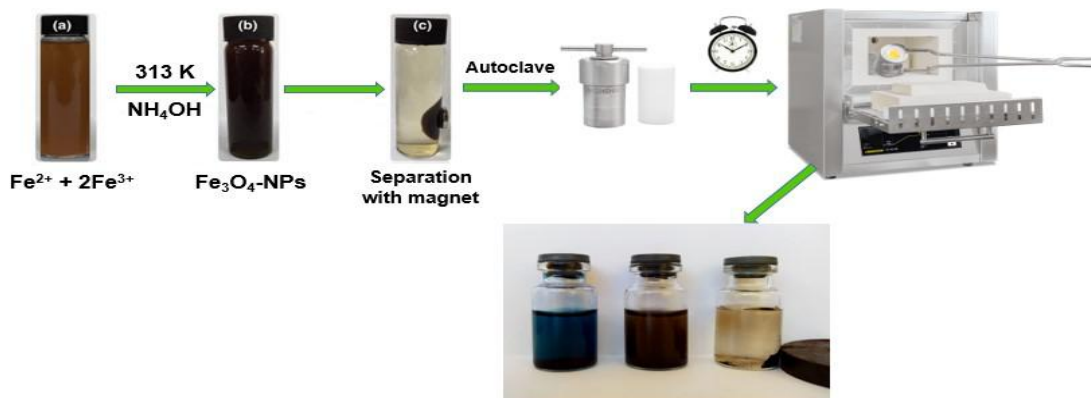
Filtrlangan mahsulot quritish shkafida (Memmert UF55) 423 K haroratda 8 soat termik ishlov berildi. Bu jarayon makromolekulalarni o'zaro tarmoqlanishini ta'minlab, anion almashinuvi xususiyatlarini mustahkamladi. Mahsulot distillangan suvda pH 7,0 ga yetguncha (pH-metr HI 2211, Hanna Instruments) yuvildi va 333 K da 12 soat quritildi. Natijada olingan PPE-1 granulari (0,4–2,0 mm) jigarrangga ega bo'lib, element tahlili (Oxford Instruments EDX) natijalariga ko'ra, 7,10 % N va 14,47 % Cl saqlagan. Statik almashuv sig'imi (SAS) GOST 20255.1-89 bo'yicha 6.2 mg-ekv/g deb aniqlandi.

Fe₃O₄/PPE-1 magnitli kompozit materialning sintezi

Fe₃O₄/PPE-1 magnitli kompozit materiali PPE-1 asosida Fe₃O₄ nanozarrachalari birgalikda cho'ktirish usuli bilan integratsiya qilinib sintez qilindi. Jarayon quyidagi bosqichlarda amalga oshirildi:

FeCl₃·6H₂O (99%, Merck) va FeSO₄·7H₂O (98%, Sigma-Aldrich) tuzlari Fe²⁺/Fe³⁺ 1:2 molyar nisbatda (0,05 mol Fe²⁺ va 0,10 mol Fe³⁺) 100 ml deionizatsiyalangan suvda eritildi. Eritma 50 °C da gomogen holatga kelguncha magnit aralashtirgichda 400 rpm tezlikda aralashtirildi. Eritma 50 °C da bir hil holga keltirilgach, unga funksional polimer qo'shildi va aralashtirish 60 °C da ikki soat davomida davom ettirildi. Bu bosqichda PPE-1 yuzasida Fe²⁺ va Fe³⁺ ionlarining adsorbsiyasi ro'y berdi, bu SEM (EVO MA-10, Carl Zeiss) tasvirlarida g'ovaksimon polimer yuzasida temir oksidi bilan qoplanishi bilan tasdiqlandi. Sintezning yakuniy bosqichi qorarang paydo bo'lgunga qadar 25% li NH₄OH eritmasini asta-sekinlik bilan tomchilatib qo'shildi, bunda eritmada magnit nanozarrachalari hosil bo'lganligini ko'rish mumkin. Keyingi qadamlar qoldiq ammoniy ionlari aralashmasini distillangan suv bilan qayta-qayta yuvish orqali yo'q qilinadi. Yuvilgan funksional polimer magnit nanokompozitlari 80 °C da 12 soat davomida quritishga qo'yiladi. Olingan Fe₃O₄/PPE-1 materiali magnit xususiyatlarga ega bo'lib, XRD (Bruker D8 Advance) tahlilida Fe₃O₄ fazasining mavjudligi tasdiqlandi(34).

1-rasmda funksional polimer metall nanokompozitlarning sintezi ko'rsatilgan.



Rasm 1 Temir ionlarini gidrotermal qizdirish usuli yordamida funksional polimer magnit nanokompozitlar sintez qilish reaksiya sxemasi.

MUHOKAMA VA NATIJALAR

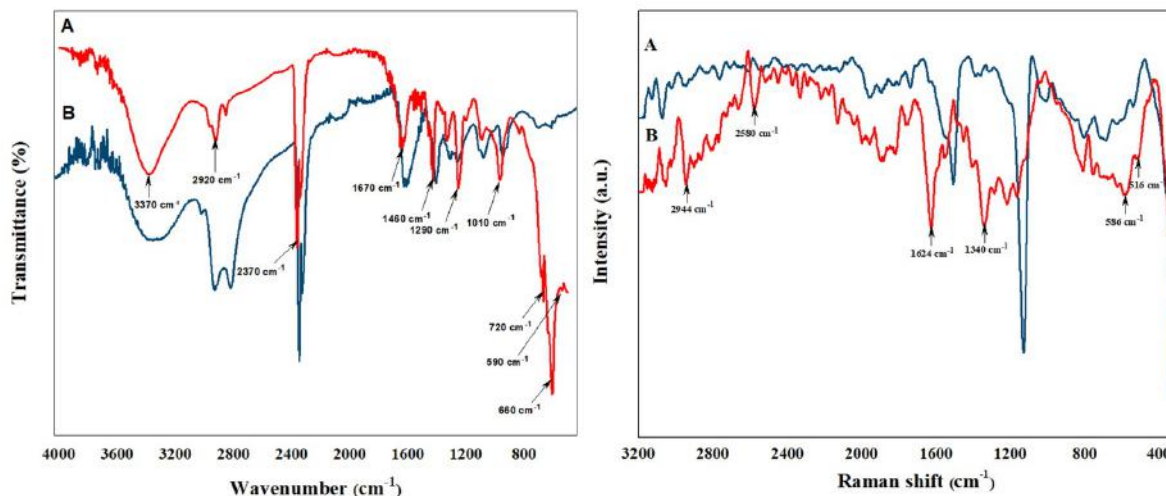
Olingan funksional polimer metal kompozitning tuzilishini tahlil qilish uchun IQ va Raman spektroskopik usullari qo'llanildi. FPMning dastlabki(A) va FPM yuzasida Fe₃O₄ (B) hosil bo'lgandan keyingi IQ spektri 2-rasmda keltirilgan. IQ spektri tahlili natijalariga ko'ra, Fe₃O₄

KIMYO

kiritilishidan keyin funksional polimer materialning tuzilishida sezilarli o'zgarishlarga olib keldi. Bu o'zgarishlar funksional polimer materialning kimyoviy tuzilishi va Fe_3O_4 nanozarrachalarini bog'lash mexanizmini tushunishda muhim rol o'ynaydi.

Dastlabki FPM va FPM yuzasida Fe_3O_4 hosil bo'lgandan keyingi funksional polimer materialning spektrlari o'rtasidagi farqlarni batafsilroq ko'rib chiqaylik. Dastlabki funksional polimer material tarkibida va funksional polimer material yuzasida Fe_3O_4 hosil bo'lgandan keyingi funksional polimer material spektrlarida 3370 cm^{-1} sohalarda keng va kuchli O-H guruhiga taa'luqli cho'qqilarning mavjudligi funksional polimer material tarkibidagi suv molekularidagi vodorod bog'lanishni mavjudligini tasdiqlaydi, sababi qatron tarkibida namlik $\sim 48\%$ ni tashkil qiladi. 2370 cm^{-1} sohalarda $-\text{CH}_2$ va $-\text{CH}_3$ alkil guruhlarining valent tebranishlarini, 1670 cm^{-1} sohasidagi N-H bog'larining valent tebranishlari amin bog'larni, 1460 cm^{-1} sohalardagi C-N bog'larining valent tebranishlari funksional polimer material tarkibida ikkilamchi amin borligini tasdiqlaydi.

FPM yuzasida Fe_3O_4 hosil bo'lgandan keyingi funksional polimer material spektrlarida 3300 dan 3370 cm^{-1} sohadagi valent tebranishlar siljiganligi kuzatildi, bu FPM tarkibidagi suv molekulari vodorod bog'lanish orqali FPMning amin guruhlari bilan Fe_3O_4 o'zaro ta'siri orqali hosil



Rasm 2. PPE-1 va $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ ning IQ va Raman spektrlari

bo'lganligini ko'rsatadi. 2920 cm^{-1} sohasida $-\text{CH}_2$ va $-\text{CH}_3$ guruhlarining valent tebranishlarini, 1670 cm^{-1} sohasidagi N-H bog'larining valent tebranishlari amin bog'larni, 1460 cm^{-1} va 1010 cm^{-1} sohalardagi C-N bog'larining valent tebranishlari FPM tarkibida ikkilamchi amin borligini tasdiqlaydi, $660\text{--}590\text{ cm}^{-1}$ sohalarda FPMda kuzatilmagan yangi simmetrik va asimmetrik deformatsion tebranishlari FPMning Fe_3O_4 bilan bog'langanligini va Fe-O guruhlar mavjudligini ko'rsatadi, bu esa kompozitning xususiyatlariga, jumladan, uning mexanik mustahkamligi, termostabilligi va potensial fotokatalitik xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin.

IQ spektroskopiyasi Me-O bog'lanishga tegishli bo'lgan tebranish sohasining intensivligini yetarli darajada ko'rsata olmaganligi sababli, uni to'ldirish maqsadida Raman spektroskopik tahlildan foydalanildi. Quyidagi 2-rasmda FPMning dastlabki(A) va FPM yuzasida Fe_3O_4 (B) ning Raman spektri keltirilgan bo'lib PPE-1 kuzatilmaydigan yuqori chastotali to'liq uzunliklari 2944 cm^{-1} , 2580 cm^{-1} , 1624 cm^{-1} , 1340 cm^{-1} , $586\text{--}516\text{ cm}^{-1}$ tebranish sohalari kuzatilgan.

Fe_3O_4 funksional material yuzasida modifikatsiyalangan so'ng PPE-1 spektrlarida $586\text{--}516\text{ cm}^{-1}$ tebranish sohasi Fe-O bog'lariga tegishli bo'lib, rux va polimer matritsasi o'rtasida o'zaro ta'sirlashish natijasida 1624 cm^{-1} (C-N), 1340 cm^{-1} (C-H) sohalardagi tebranishlar FPM tarkibida juda kuchli intensivlikni namoyon qilgan. Bu esa PPE-1 yuzasida Fe_3O_4 nanozarrachasi PPE-1 bilan o'zaro donor-akseptor va Van der Waals ta'sirlar orqali bog'lanish hosil bo'lganligini hamda bu FPMning matritsasiidagi funksional guruhlarni tebranish sohalariga ta'sir qilishini ko'rsatadi.

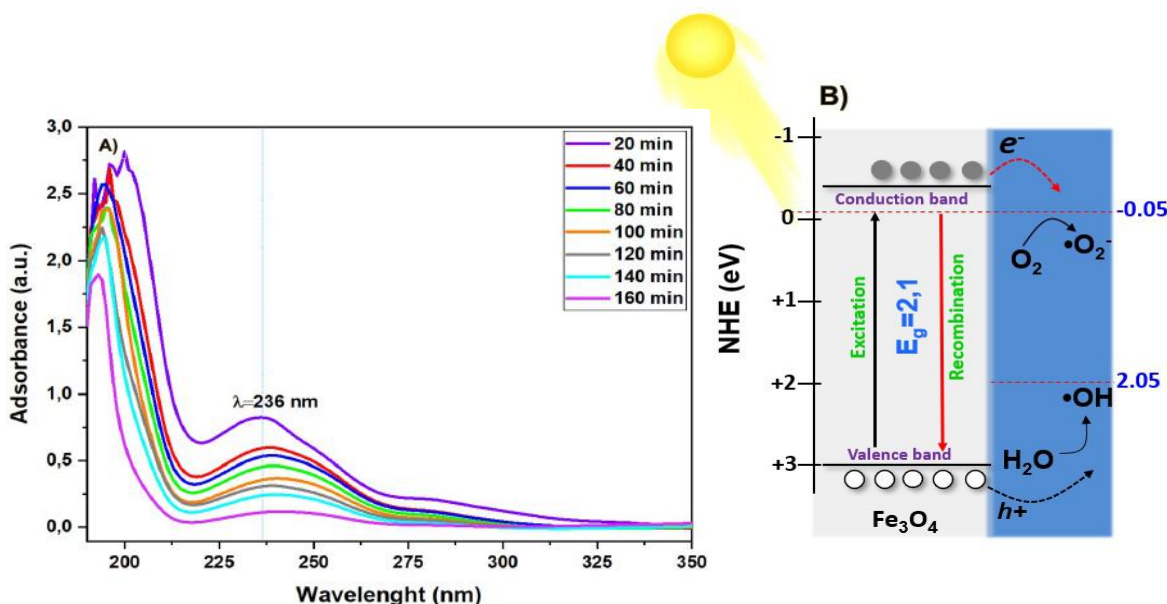
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ ni optik va fotokatalitik xossalarini UB-spektroskopik analizi

Magnit polimer nanokompozitning fotokatalitik faolligi va optik xususiyatlari uning strukturaviy va energetik xususiyatlariga asoslanadi, bu esa uni organik ifloslantiruvchilar (parasetamol)ni degradatsiya qilishda samarali qiladi. Ushbu materialning optik xossalari UV-Vis spektroskopiya (Specord 210 Plus) yordamida 200–600 nm oralig'ida o'lchandi, bunda $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ 370 nm da keng yutilish cho'qqisini ko'rsatdi. Tauc usuli ($(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$) asosida taqiqlanish soha energiyasi 2.1 eV tengligi aniqlandi, bu Fe_3O_4 ning yarimo'tkazgich xususiyatlari va PPE-1 bilan sinerjiyasini tasdiqlaydi. Mott-Schottky usuli bilan hisoblangan valent soha ($V_B = 2.05$ eV) va o'tkazuvchi soha ($C_B = -0.05$ eV) potentsiallari UB nurlanishi ostida elektron-kovak juftliklarini hosil qilish uchun yetarli energiyani ta'minlaydi.

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ ning parasetamolga nisbatan fotokatalitik parchalanish xususiyatlari

Olingan FPM asosidagi Fe_3O_4 nanozarrachasini fotokatalitik faolligini o'rganish uchun farmatsevtika oqava suvlaridagi parasetamolni UB nuri ta'sirida fotokatalitik parchalanish reaksiyasida qo'llanildi. Buning uchun $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ ning fotokatalitik faolligi 50 mg/L parasetamol (99%, Sigma-Aldrich) eritmasida UB lampalari (36 Vt, $\lambda = 365$ nm, intensivlik 30 mW/cm²) bilan jihozlangan reaktorlarda, 25–40°C haroratda, pH 6.5–8.0 sharoitida sinovdan o'tkazildi. Parasetamolning yutilish spektri (Shimadzu-1900i) 236 nm da o'lchandi (3-rasm).

Fotokatalitik degradatsiya jarayonida parasetamol konsentratsiyasining vaqtga bog'liq



Rasm 3. Parasetamolni fotokatalitik parchalanishining UV-Vis spektridagi yutilish spektrining to'liq uzunligiga bog'liqligi (A)

pasayishi quyidagi formula asosida hisoblandi:

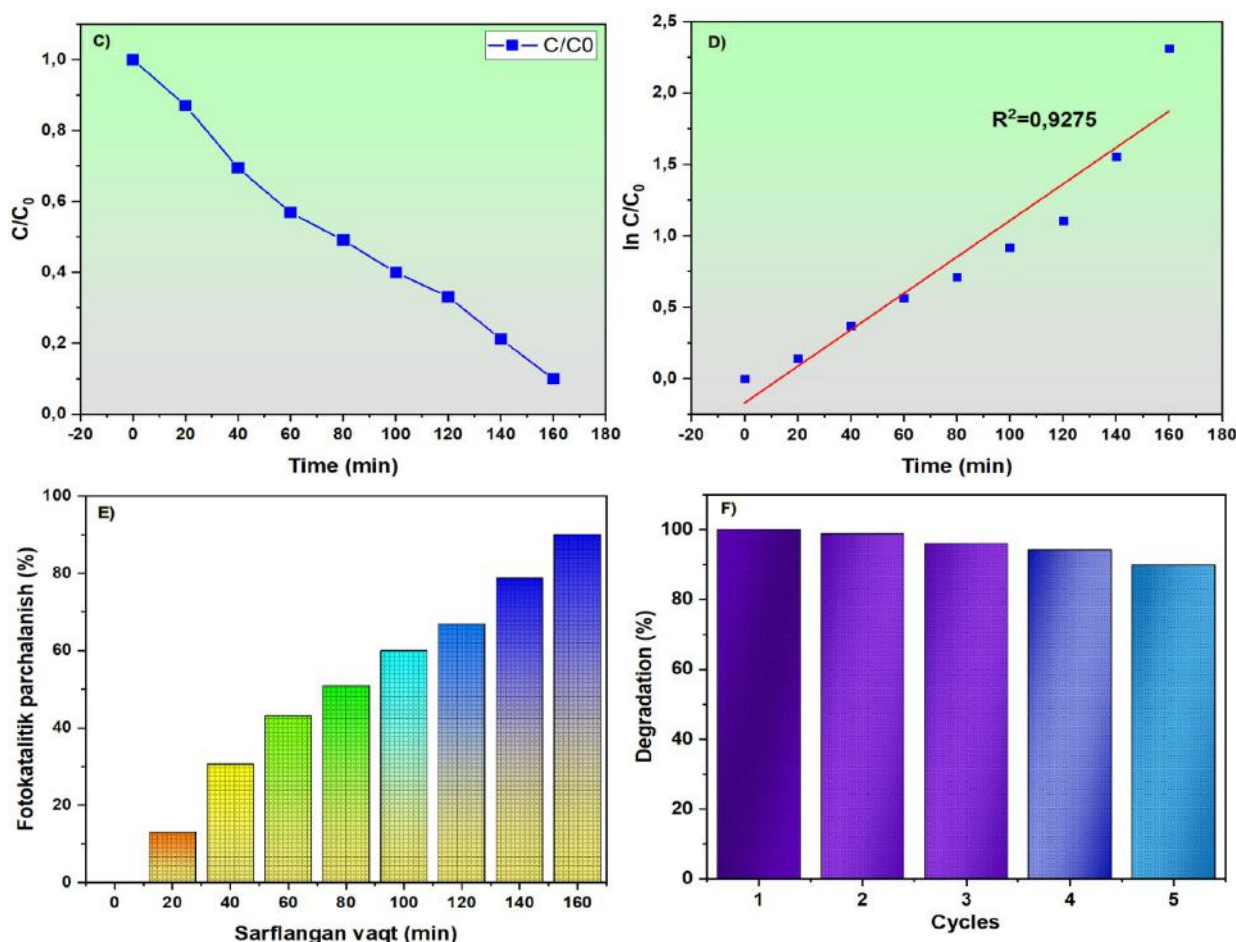
$$D(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

Bu yerda: C_t – t vaqtidagi konsentratsiya (mg/L); C_0 – dastlabki konsentratsiya (mg/L). 160 daqiqa davomida o'tkazilgan tajribalar natijasida yutilish intensivligini $85 \pm 5\%$ pasayishini ko'rsatdi, bu fotodegradatsiyaning yuqori samaradorligini tasdiqlaydi

Kinetik tahlil jarayonining psevdobirinchi tartibli kinetika modelga mos kelishi aniqlandi:

$$\ln \left(\frac{C_0}{C_t} \right) = k_{app} t$$

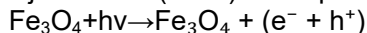
Kinetika Langmuir-Hinshelwood modeliga asosan psevdobirinchi tartibli modelga bo'ysinib tezlik konstantasi $k = 0.01276 \text{ min}^{-1}$ ga, chiziqli korelyatsiya koeffitsienti $R^2 = 0.9275$ ga teng bo'ldi. 4-rasmda (C) parasetamolning degradatsiya kinetikasi grafiqi keltirilgan.



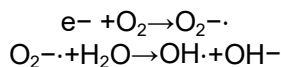
Rasm 4. Parasetamol (50 mg/L) ning fotokatalizator ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$) ishtirokida UB, nuri ta'siridagi destruksiya egrilari (C), parasetamolning fotokatalizator ishtirokidagi degradatsiyasining birinchi (D), tartibli kinetik modeli, parasetamolning fotokatalizator ishtirokidagi degradatsiyasining foizi (E), fotokatalizatorning qayta ishlatilish qobiliyati (F)

Fotokatalitik mexanizmining borishi

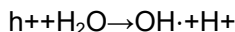
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ ning fotokatalitik parchalanish xususiyatlari Fe_3O_4 nanozarrachalari va PPE-1 polimer matritsasining sinergetik ta'siriga asoslanadi. UB nurlanishi ($\lambda=365$ nm) ta'sirida Fe_3O_4 fotoinduksiyalangan elektron-kovak juftliklarini (e^-/h^+) hosil qiladi:



Elektronlar (e^-) eritmadagi kislorod bilan reaksiyaga kirishib, reaktiv kislorod turlarini (ROS) hosil qiladi:



Kovaklar (h^+) parasetamol molekularini oksidlashi yoki qo'shimcha $\text{OH} \cdot$ radikallarini hosil qiladi:



Bu ROS turlari parasetamolning aromatik halqasini parchalab, uni N-asetil-p-benzoxinonimin (NAPQI), p-benzoxinon va boshqa metabolitlargacha quyi molekulyar birikmalarga (masalan, organik kislotalar, CO_2 va H_2O) aylantiradi, bu MASS-spektroskopiya natijalari bilan tasdiqlandi (5-6-rasm). PPE-1 matritsasi Fe_3O_4 nanozarrachalarini barqaror ushlab turadi va parasetamolning sirtga adsorbsiyasini osonlashtiradi, bu psevdobirinchi tartibli kinetikaning yuqori mosligini ($R^2=0.9275$) qo'llab-quvvatlaydi. Magnit xususiyatlar materialning reaksiya muhitidan ajratilishini ta'minlaydi, bu uning amaliy qo'llanilishini oshiradi.

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ ning qayta ishlatilish qobiliyati 5 marotaba qayta sinovdan o'tkazildi, har bir davrda 50 mg/L parasetamol eritmasidan foydalanildi. Magnit yordamida ajratib olinib material 5 marotaba qayta sinovdan so'ng 90% fotokatalitik faollikni saqladi. Faollikning 10% ga pasayishi sirt faol zonalarining qisman to'lib qolishi yoki nanozarrachalar agregatsiyasi bilan bog'liq bo'lishi mumkin, lekin bu magnit xususiyatiga ta'sir ko'rsatmadi. Taqiqlanish sohasi kengligi (2.1 eV) va energetik sath barqarorligi materialning uzoq muddatli foydalanishga yaroqliligini qo'llab-quvvatlaydi.

HP-LC/MS analiz tahlili

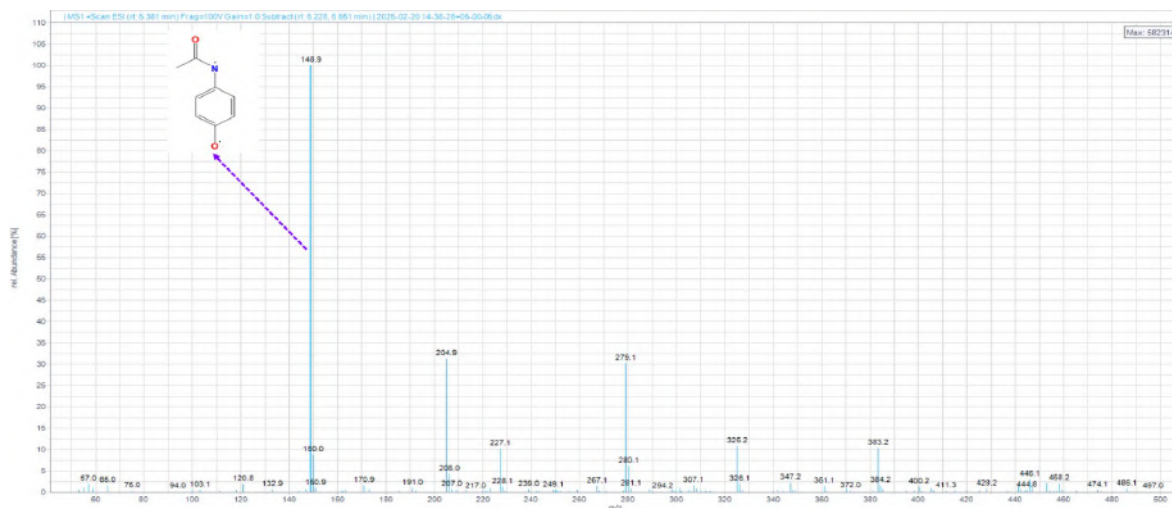
Spektrofotometrik tahlil natijalariga ko'ra, 160 daqiqa ichida parasetamol 85% samaradorlik bilan fotokatalitik degradasiyaga uchradi, oqava suv tarkibida parasetamol konsentratsiyasi 1 mg/L dan pastga tushdi, bu O'zbekiston Respublikasi Ekologiya vazirligining "Suv ifloslanishini nazorat qilish" me'yorlariga (**BOD < 50 mg/L, COD < 150 mg/L, organik birikmalar < 1 mg/L**) mos keladi. MASS-spektroskopiya tahlillari parasetamolning dastlabki va 160 minutdan keyingi holatini tasdiqladi (1-rasm: dastlabki MASS-spektr; 2-rasm: fotokatalitik degradasiyadan keyingi MASS-spektr).

HPLC-MS tahlili parasetamolning (m/z 151) degradatsiya yo'lini vaqt bo'yicha dinamik o'zgarishlarni aniqladi. Dastlabki bosqichda (0–30 daqiqa) OH radikallari aromatik halqaga hujum qilib, gidroksillangan P1 (m/z 167) hosil qildi, bu 4-hidroksi-parasetamolga mos keladi. 60 daqiqaga kelib, asetamid guruhining demetilatsiyasi orqali P2 (m/z 137) paydo bo'ldi, bu $-\text{CH}_3$ yo'qolishini ko'rsatadi. NAPQI (m/z 149) dastlabki namunalarda (30–60 daqiqa) o'rtacha intensivlikda kuzatildi, ammo 90 daqiqadan keyin intensivligi sezilarli darajada kamaydi, bu uning keyingi oksidlanishi yoki barqarorligining pasayishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. MASS tahlili NAPQI ning taxminan 60% ni tashkil qilishini tasdiqladi, lekin HPLC-MS da past intensivlik pH (6.5–8.0) va doimiy harakatlanuvchi faza sharoitlarida uning tez parchalanishiga ishora qiladi. 120 daqiqada P4 (m/z 108, p-benzokinon) dominant bo'ldi (MASS da 25%), aromatik halqaning qisman yorilishi bilan P7 (m/z 94, benzoik kislota hosilasi) va P8 (m/z 80) aniqlandi. 160 daqiqaga kelib, P9 (m/z 66), P10 (m/z 44, CO_2 ga yaqin) va P11 (m/z 18, H_2O) mineralizatsiyaning yakuniy mahsulotlari sifatida qayd etildi.

Olingan natijalar $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ fotokatalizatorining farmatsevtik oqava suvlardagi parasetamolni quyosh nuri ta'sirida 90% samaradorlik bilan parchalashini va sanoat sharoitida yuqori iqtisodiy samaradorlik keltirishini tasdiqladi.

XULOSA

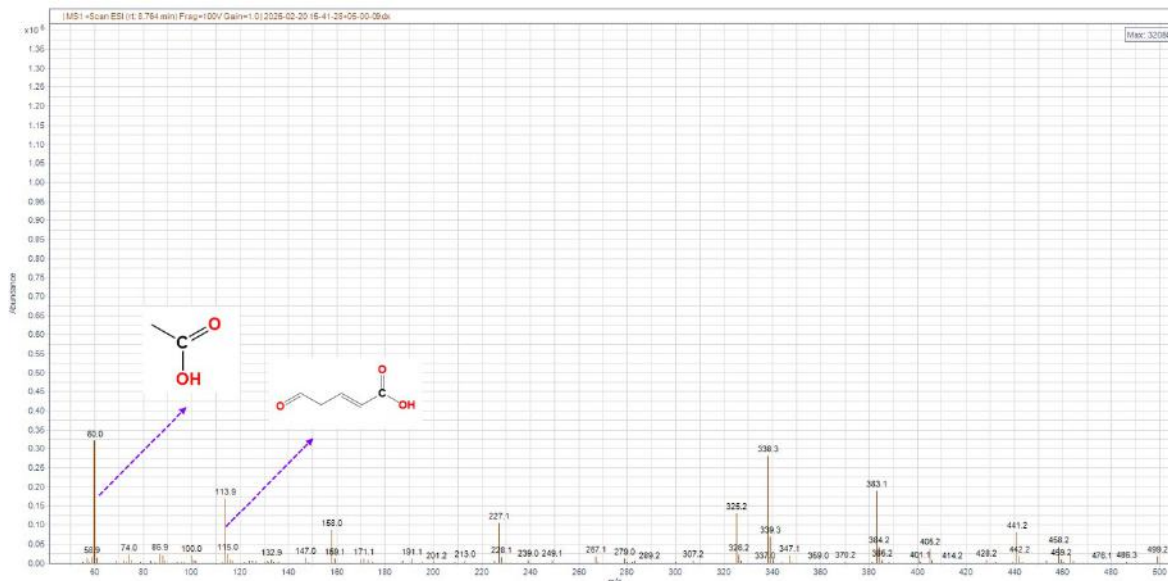
Ushbu tadqiqotda magnit xossalari $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ nanokompoziti yordamida farmatsevtika chiqindi suvlaridagi parasetamolning fotokatalitik degradatsiyasi muvaffaqiyatli o'rganildi. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPE-1}$ UB nurlanishi ($\lambda=365$ nm) ostida 160 daqiqada parasetamolni $85\pm5\%$ samaradorlik



Rasm 5. Parasetamolning dastlabki MASS-spektri

KIMYO

bilan parchalab, psevdobirinchitartibli kinetic modelga ($k_{app}=0.01276 \text{ min}^{-1}$) bo'ysundi. HPLC-MS tahlillari degradatsiya yo'lini aniqlab, parasetamolning N-asetil-p-benzokinonimin (NAPQI, ~60%) va p-benzokinon (~25%) kabi toksik metabolitlarga, so'ngra CO_2 va H_2O ga mineralizatsiyasini tasdiqladi. PPE-1 polimer matritsasi adsorbsiya va zaryad ajralishini yaxshilab, Fe_3O_4 bilan sinergik ta'sir ko'rsatdi, magnit xususiyatlar esa 5 siklda 90% faollikni saqlashga imkon berdi.



Rasm 6. Parasetamolning fotokatalitik degradatsiyadan keyingi MASS-spektri

ADABIYOTLAR RO'YXATI

- Samal K, Mahapatra S, Hibzur Ali M. Pharmaceutical wastewater as Emerging Contaminants (EC): Treatment technologies, impact on environment and human health. *Energy Nexus*. 2022 Jun 16;6:100076.
- Zenker A, Cicero MR, Prestinaci F, Bottoni P, Carere M. Bioaccumulation and biomagnification potential of pharmaceuticals with a focus to the aquatic environment. *J Environ Manage*. 2014 Jan 15;133:378–87.
- PF-16-сон 30.01.2025. "O'zbekiston-2030" strategiyasini "Atrof-muhitni asrash va "yashil iqtisodiyot" yilida amalga oshirishga oid davlat dasturi to'g'risida [Internet]. [cited 2025 Mar 18]. Available from: <https://lex.uz/uz/docs/-7369703>
- Eshtursunov D, Inkhonova A, Botirov S, Fayzullayev Y, Bekchanov D, Mukhamediev M. Removal of Rhodamine B from Wastewater by Adsorption using Iron Oxide-Polymer Composite Material. *Asian J Chem*. 2024;36(1):32–6.
- Jiang X, Zhu B, Zhu M. An overview on the recycling of waste poly(vinyl chloride). *Green Chem*. 2023 Sep 18;25(18):6971–7025.
- Gilbert M, Patrick S. Chapter 13 - Poly(Vinyl Chloride). In: Gilbert M, editor. *Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)* [Internet]. Butterworth-Heinemann; 2017 [cited 2025 Jan 6]. p. 329–88. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032335824800013X>
- Elgharbawy A. Poly Vinyl Chloride Additives and Applications-A Review. *J Risk Anal Crisis Response* [Internet]. 2022 Sep 30 [cited 2025 Jan 6];12(3). Available from: <https://www.jracr.com/index.php/jracr/article/view/335>
- Lewandowski K, Skórczewska K. A Brief Review of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Recycling. *Polymers*. 2022 Jan;14(15):3035.
- Pielichowski K, Njuguna J, Majka TM. 6 - Thermal degradation of polymers, copolymers, and blends. In: Pielichowski K, Njuguna J, Majka TM, editors. *Thermal Degradation of Polymeric Materials (Second Edition)* [Internet]. Elsevier; 2023 [cited 2025 Jan 6]. p. 49–147. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128230237000162>
- Yu J, Sun L, Ma C, Qiao Y, Yao H. Thermal degradation of PVC: A review. *Waste Manag*. 2016 Feb 1;48:300–14.
- Lieberzeit P, Bekchanov D, Mukhamediev M. Polyvinyl chloride modifications, properties, and applications: Review. *Polym Adv Technol*. 2022;33(6):1809–20.
- Edo GI, Ndudi W, Ali ABM, Yousif E, Zainulabdeen K, Onyibe PN, et al. Poly(vinyl chloride) (PVC): an updated review of its properties, polymerization, modification, recycling, and applications. *J Mater Sci*. 2024 Dec 1;59(47):21605–48.
- Sarkar S, Guibal E, Quignard F, SenGupta AK. Polymer-supported metals and metal oxide nanoparticles: synthesis, characterization, and applications. *J Nanoparticle Res*. 2012 Jan 25;14(2):715.

14. Zadehnazari A. Metal oxide/polymer nanocomposites: A review on recent advances in fabrication and applications. *Polym-Plast Technol Mater.* 2023 Mar 24;62(5):655–700.
15. Alhalili Z. Metal Oxides Nanoparticles: General Structural Description, Chemical, Physical, and Biological Synthesis Methods, Role in Pesticides and Heavy Metal Removal through Wastewater Treatment. *Molecules.* 2023 Jan;28(7):3086.
16. Baig N, Kammakakam I, Falath W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Mater Adv.* 2021;2(6):1821–71.
17. Ahire SA, Bachhav AA, Pawar TB, Jagdale BS, Patil AV, Koli PB. The Augmentation of nanotechnology era: A concise review on fundamental concepts of nanotechnology and applications in material science and technology. *Results Chem.* 2022 Jan 1;4:100633.
18. Hajfathalian M, Mossburg KJ, Radaic A, Woo KE, Jonnalagadda P, Kapila Y, et al. A review of recent advances in the use of complex metal nanostructures for biomedical applications from diagnosis to treatment. *WIREs Nanomedicine Nanobiotechnology.* 2024;16(3):e1959.
19. Yaqoob AA, Parveen T, Umar K, Mohamad Ibrahim MN. Role of Nanomaterials in the Treatment of Wastewater: A Review. *Water.* 2020 Feb;12(2):495.
20. Epelle EI, Okoye PU, Roddy S, Gunes B, Okolie JA. Advances in the Applications of Nanomaterials for Wastewater Treatment. *Environments.* 2022 Nov;9(11):141.
21. Alazaiza MYD, Albahnasawi A, Ali GAM, Bashir MJK, Coptly NK, Amr SSA, et al. Recent Advances of Nanoremediation Technologies for Soil and Groundwater Remediation: A Review. *Water.* 2021 Jan;13(16):2186.
22. Mathur J, Goswami P, Gupta A, Srivastava S, Minkina T, Shan S, et al. Nanomaterials for Water Remediation: An Efficient Strategy for Prevention of Metal(loid) Hazard. *Water.* 2022 Jan;14(24):3998.
23. Marchal W, De Sloovere D, Daenen M, Van Bael MK, Hardy A. Precursor Design Strategies for the Low-Temperature Synthesis of Functional Oxides: It's All in the Chemistry. *Chem – Eur J.* 2020;26(42):9070–83.
24. Borjigin T, Schmitt M, Morlet-Savary F, Xiao P, Lalevée J. Low-Cost and Recyclable Photocatalysts: Metal Oxide/Polymer Composites Applied in the Catalytic Breakdown of Dyes. *Photochem.* 2022 Sep;2(3):733–51.
25. PubChem. Acetaminophen [Internet]. [cited 2025 Mar 18]. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1983>
26. Dahlin DC, Miwa GT, Lu AY, Nelson SD. N-acetyl-p-benzoquinone imine: a cytochrome P-450-mediated oxidation product of acetaminophen. *Proc Natl Acad Sci.* 1984 Mar;81(5):1327–31.
27. Bedner M, MacCrehan WA. Transformation of acetaminophen by chlorination produces the toxicants 1,4-benzoquinone and N-acetyl-p-benzoquinone imine. *Environ Sci Technol.* 2006 Jan 15;40(2):516–22.
28. Shojaie L, Alavifard H, Dara L. Chapter 5 - Cell death in acetaminophen (APAP) toxicity. In: Rumack BH, Jaeschke H, McGill MR, editors. *Acetaminophen Toxicity* [Internet]. Academic Press; 2025 [cited 2025 Mar 25]. p. 87–123. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443158773000119>
29. Nunes B, Nunes J, Soares AMVM, Figueira E, Freitas R. Toxicological effects of paracetamol on the clam *Ruditapes philippinarum*: exposure vs recovery. *Aquat Toxicol.* 2017 Nov 1;192:198–206.
30. Okeke ES, Ezeorba TPC, Okoye CO, Chen Y, Mao G, Feng W, et al. Environmental and health impact of unrecovered API from pharmaceutical manufacturing wastes: A review of contemporary treatment, recycling and management strategies. *Sustain Chem Pharm.* 2022 Dec 1;30:100865.
31. Mosharaf MK, Gomes RL, Cook S, Alam MS, Rasmussen A. Wastewater reuse and pharmaceutical pollution in agriculture: Uptake, transport, accumulation and metabolism of pharmaceutical pollutants within plants. *Chemosphere.* 2024 Sep 1;364:143055.
32. Lu Q, Choi K, Nam JD, Choi HJ. Magnetic Polymer Composite Particles: Design and Magnetorheology. *Polymers.* 2021 Jan;13(4):512.
33. Mukhamediev MG, Bekchanov DZh. New Anion Exchanger Based on Polyvinyl Chloride and Its Application in Industrial Water Treatment. *Russ J Appl Chem.* 2019 Nov 1;92(11):1499–505.
34. Bekchanov D, Mukhamediev M, Inkhonova A, Eshtursunov D, Babojonova G, Rajabov O, et al. Magnetic and reusable Fe₃O₄/PPE-2 functional material for efficient photodegradation of organic dye. *Environ Res.* 2025 Mar 15;269:120911.