

NANOMATERIALLARNI XARAKTERLASH TEXNOLOGIYALARI VA NANOTEXNOLOGIYA SOHASIDAGI ZAMONAVIY TADQIQOTLAR

Esanov Shaxzod Sheramat o'g'li

Toshkent Davlat Tibbiyot universiteti

Biotibbiyot muhandisligi, Informatika va Biofizika kafedrasining assistenti.

E-mail: esanovshaxzod1998@gmail.com

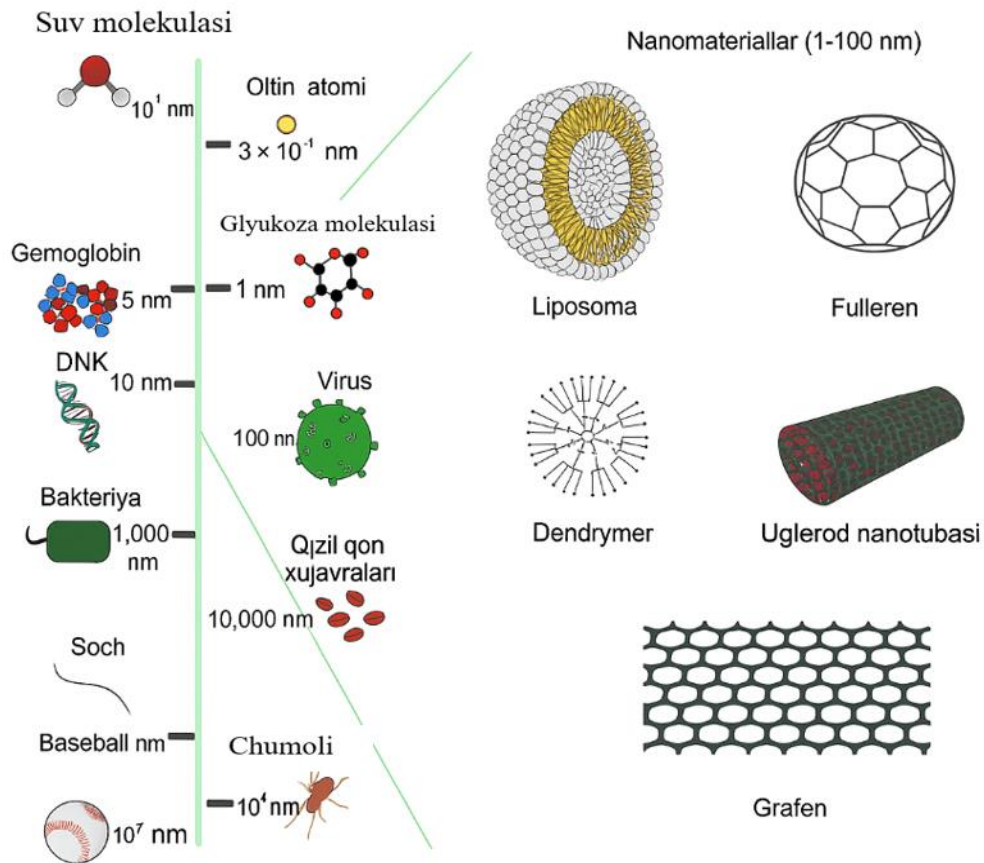
Tel: +998900040959

Annotatsiya: *Ushbu maqolada nanomateriallarning fizikaviy, kimyoviy, morfologik va termodinamik xususiyatlarini aniqlashga yo'naltirilgan zamonaviy xarakterlash usullari hamda ularning laboratoriya va sanoat amaliyotidagi tadbirlari batafsil tahlil qilinadi. Maqolada SEM, TEM, AFM, XRD, FTIR, Raman, DLS, BET, TGA/DSC, XPS va boshqa ilg'or usullar asosiy misollar sifatida keltiriladi. Shuningdek, qo'llanilish sohalari (biomeditsina, energetika, ekologiya, elektronika) va xavfsizlik, standartlashtirish masalalari muhokama qilinadi.*

Kalit so'zlar: *nanomateriallar, xarakterlash, SEM, TEM, XRD, FTIR, BET, zeta potensial, SPION, uglerod kvant nuqtalari, nanotexnologiya.*

KIRISH

Nanotexnologiya — atom va molekula darajasida materiallar sintezi va funksionalizatsiyasini o'rganadigan fan sohasi bo'lib, asosiy ob'ekti 1–100 nm o'lchamdagi nanomateriallardir. Ushbu materiallarning fizikaviy, kimyoviy va biologik xususiyatlari katta o'lchamdagi materiallardan farq qiladi. Bu farqlar kvant effektlari, yuqori sirt maydoni va sirt energetikasining oshishi bilan bog'liq bo'lib, optik, elektron, kimyoviy faollik va mexanik xususiyatlarda yangi imkoniyatlar yaratadi. Masalan, kvant-kontinualizm elektronlarning diskret energiya darajalarini hosil qiladi, bu kvant nuqtalarida hajmga bog'liq fotoluminesensiyani shakllantiradi. Yuqori sirt maydoni esa katalitik, adsorbsion va interfeys jarayonlarini kuchaytirib, sensorlar, katalizatorlar va adsorbentlar ishlab chiqarishda muhim rol o'ynaydi. Nanomateriallarning mexanik xususiyatlari, masalan, mustahkamlik va elastiklik, nano-o'lchamda o'ziga xos xatti-harakatlarni namoyon qiladi. Shu sababli, nanomateriallarni aniq xarakterlash ularni fundamental tadqiqotlardan amaliy sohalarga o'tkazishda muhim ahamiyatga ega.



Nanomateriallarni xarakterlash nafaqat o'lchash, balki namunani tayyorlash, sintez shartlarini aniqlash va natijalarni takrorlanadigan qilishni ham o'z ichiga oladi. Bu jarayonda zarracha o'lchamlari taqsimoti (PDI), sirt kimyosi, kristall tuzilishi va termal barqarorlikni o'rganish uchun turli metodlar birgalikda qo'llaniladi. ISO/TS 80004-1:2015 kabi xalqaro standartlar nanomateriallar terminologiyasini bir xilda belgilashda muhim rol o'ynaydi, ilmiy tadqiqotlarni solishtirish va qonuniy talablarga rioya qilishni ta'minlaydi. Ammo standartlarni qo'llashda ehtiyotkorlik zarur, chunki o'lchov sharoitlari (erituvchi, konsentratsiya, pH, harorat), namuna tayyorlash va asbob sozlamalari natijalarga katta ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun ilmiy maqolalar va hisobotlarda metodologiyani batafsil tasvirlash, parametrlarning aniqligi va natijalarning statistik ishonchliligi muhimdir. Ushbu maqolada nanomateriallarni xarakterlashning nazariy asoslari, laboratoriyada qo'llaniladigan asbob-uskunalar, ularning bir-birini to'ldiruvchi xususiyatlari hamda namuna tayyorlash va ma'lumotlarni talqin qilish bo'yicha tavsiyalar tizimli ravishda tahlil qilinadi.

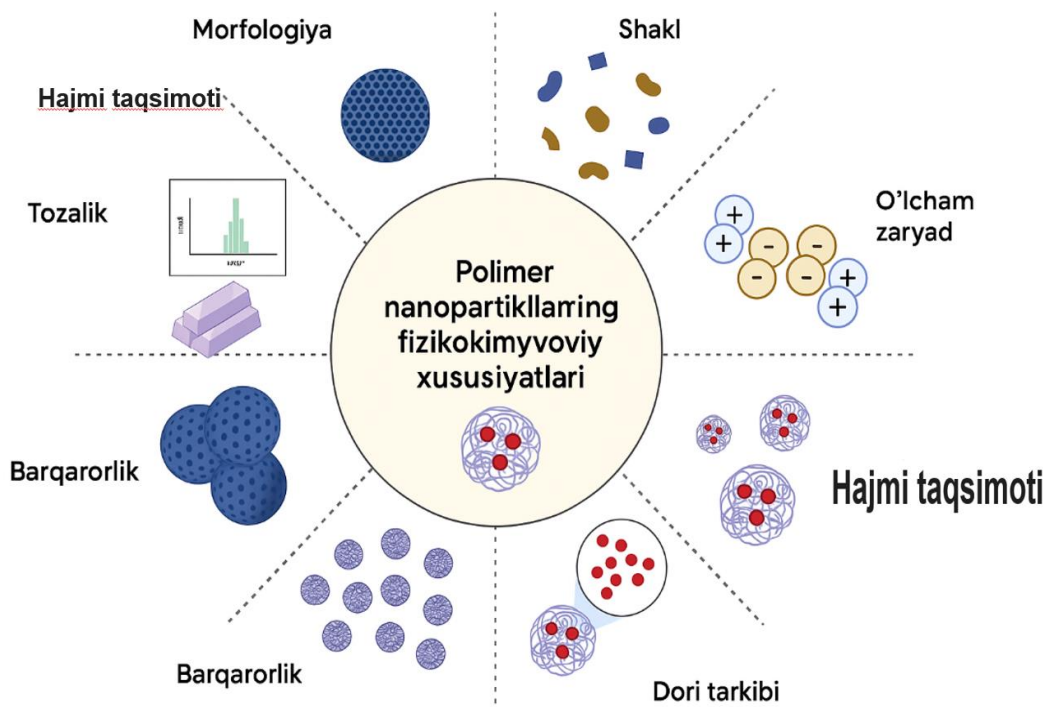
ASOSIY QISM

Nanomateriallarni tizimli va takrorlanadigan tarzda tavsiflash uchun bir nechta asosiy parametr o'lchanadi, ularning o'lchov usullari, birliklari va ilmiy ahamiyati aniq belgilanadi. Bular eksperimental shartlar, namuna tayyorlash va asbob sozlamalariga bog'liq.

O'lcham va taqsimot: Zarracha o'lchami eng muhim parametr bo'lib, o'rtacha diametr, median (D50), D10, D90, standart og'ish va polidisperslik indeksi (PDI) orqali aniqlanadi. Feret diametri no-sferik zarrachalar uchun ishlatiladi. Statistik ishonchlilik uchun 100–1000 o'lchov va PDI hisoblanadi. TEM va SEM fizik o'lchamni, TEM atomik tasvirni beradi,

lekin quruq holatda agregatsiyani o'zgartirishi mumkin. DLS gidrodinamik diametr va agregatlarni suspenziyada o'lchaydi, ammo no-sferiklik natijalarni buzishi mumkin. Morfologiyasi zarrachalar shakli (sferik, elipsoid, ignasimon, plitkali, kubik, g'ovak yoki nanotubular) sirt reaktivligi va xususiyatlarga ta'sir qiladi. TEM va SEM ishonchli tasvirlaydi, AFM esa 3D sirt topografiyasini beradi. Uzunlik, kenglik, yon nisbati va porozlik kabi parametrlar baholanadi.

Kristall tuzilishi XRD orqali faza identifikatsiyasi, kristall don hajmi (Scherrer tenglamasi) va defektlar aniqlanadi. HRTEM atom darajasidagi tartibni tasdiqlaydi, amorf va kristallik qismlarni ajratadi. Sirt maydoni va porozlik BET gaz adsorbsiyasi orqali sirt maydoni (m^2/g) va poroz tuzilishni (mikro-/mezoporoz) o'lchaydi, bu kataliz va adsorbsiyada muhim. XPS sirt elementlari va oksidlanish holatini, FTIR funksional guruhlarni, TOF-SIMS molekulyar tarkibni aniqlaydi. Bu usullar funksionalizatsiya va kapsulyatsiyani tahlil qiladi. Zeta potentsiali suspenziyadagi elektrostatik barqarorlik $|\zeta| > 25\text{--}30$ mV bilan belgilanadi, sterik stabilizatsiya esa PEG yoki surfaktanlar bilan ta'minlanadi.

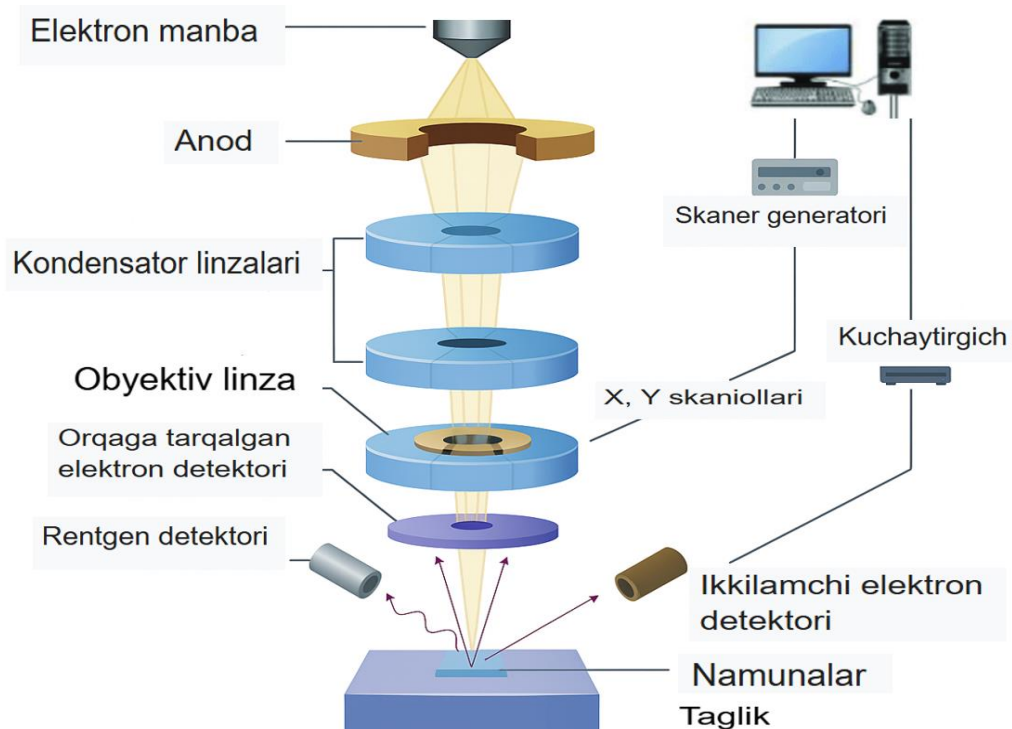


Termik va fazaviy xususiyatlari TGA (termogravimetrik analiz) materialning haroratga bog'liq massa o'zgarishini o'lchaydi, organik qoldiqlar, suv yoki termal parchalanish nuqtalarini aniqlaydi. DSC (differensial skanerlovchi kalorimetriya) faza o'tishlari, erish va kristallanish haroratlari, shuningdek, jarayonlarning entalpiyasini (J/g) hisoblaydi. Bu usullar sintez qoldiqlari, ligand ulushi va termal chidamlilik haqida ma'lumot beradi. XRF oddiy va tezkor usul bo'lib, sirt yoki asosiy elementar tarkibni aniqlaydi. ICP-MS iz elementlar va metallarni yuqori sezuvchanlikda (sub-ppb) o'lchaydi, toksik qoldiqlar yoki dopantlarni tahlil qilishda muhim. EDX esa elektron mikroskoplar bilan birgalikda tejamkor elementar analizni ta'minlaydi.

Optik va elektr xususiyatlari UV-Vis va fotoluminesensiya (PL) spektroskopiyasi nanomateriallarning o'lcham, shakl va sirt holatiga bog'liq optik xususiyatlarini, masalan,

kvant nuqtalari yoki metall nanopartikullarning plasmon rezonansini aniqlaydi. Elektr xususiyatlar (konduktivlik, yarimo‘tkazgichlik, kontakt qarshiligi) Four-point probe va Hall effekti orqali o‘lchanadi. Boshqa parametrlar, masalan, porozlik, gidrofoblik (kontakt burchagi), magnit xususiyatlar (VSM) va biotibbiy ko‘rsatkichlar (hemoliz, hujayra hayotiyli) ham baholanadi. Natijalar ishonchliligi uchun replikatlar soni, statistik tahlil (standart og‘ish, t-test, ANOVA) va o‘lchov xatolarini ko‘rsatish zarur.

Mikroskopik usullari SEM elektron nurlar yordamida sirt topografiyasi va morfologiyasini yuqori aniqlikda (bir necha nm) tasvirlaydi, EDX orqali elementar tarkibni aniqlaydi. TEM ichki tuzilish, kristallografiya va atom darajasidagi detallarni ko‘rsatadi, difraksiya naqshlari bilan faza va don hajmini hisoblaydi. TEM uchun namuna tayyorlash (ultratin kesmalar, FIB) muhim. AFM 3D sirt profilini, nano-mexanik xususiyatlarni (elastiklik, adhesiya) va dielektrik namunalarda sirt potensialini o‘lchaydi. XRD kristall fazasi, qoldiq stress va don hajmini aniqlaydi.



Bragg tenglamasi va Scherrer tenglamasi asosida faza identifikatsiyasi va don hajmi taxmini olib boriladi. XRD amorf va kristallik komponentlarni kvantitativ baholashda ham qo‘llanadi.

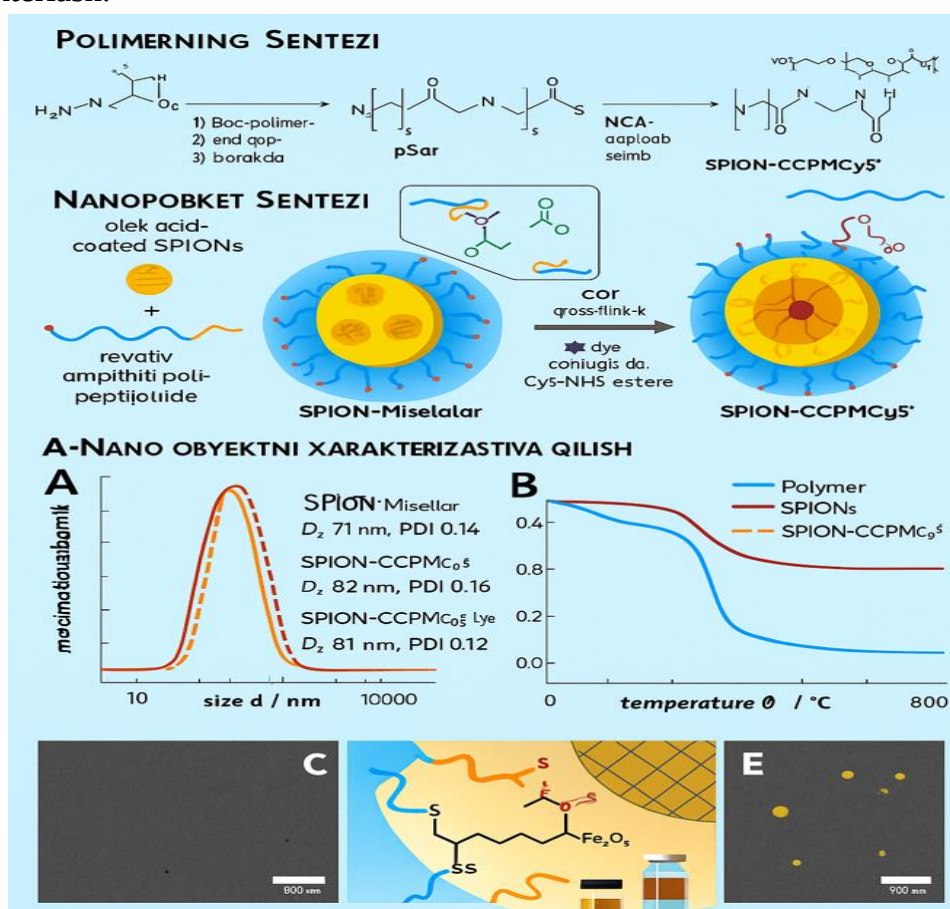
Spektroskopik usullar: FTIR, Raman, XPS, UV-Vis

- FTIR — molekulyar bog‘lanishlar va funksional guruhlarini aniqlaydi.
- Raman — kislorod va uglerodli strukturaviy shakllar, grafit/graphene tahlilida yuqori sezuvchanlik ko‘rsatadi.
- XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) — sirt elementar va kimyoviy holatini aniqlaydi (element va oksidlanish holati).
- UV-Vis va fotoluminesensiya (PL) — nanokvant nuqtalari va plasmonik zarrachalarning optik xususiyatlarini o‘lchashda ishlatiladi.

Partikula o‘lchami va kolloid xususiyatlar DLS va zeta potensial DLS (Dynamic Light Scattering) — suspenziyadagi zarralarning gidrodinamik diametrini aniqlaydi, agregatsiya

va PDI (polidisperslik indeksi) tahlilida ishlatiladi. Zeta potensial orqali kolloid barqarorlik va sirt zaryadini baholash mumkin. Sirt maydoni va porozlilik BET analizi gaz adsorbsiyasiga asoslanib sirt maydoni va poroz strukturasi (mikro-/mezoporous xususiyatlar) aniqlaydi. Bu ko'rsatkich katalizatorlar va adsorbentlar uchun juda muhim. Termal tahlilda TGA materialning massasi haroratga bog'liq o'zgarishini o'lchaydi va organik tarkib, suv/qoldiq moddalarni aniqlashda qo'l keladi. DSC esa transformatsiya nuqtalari, kristallanish va erish energiyasini aniqlashda ishlatiladi. Elementar tahlilda XRF — sirt va bulk (yuzaki) elementlarni aniqlashda tezkor usul. ICP-MS esa yuqori sezuvchanlikda iz miqdorini aniqlash uchun ishlatiladi (ppb darajalari).

Nanoobyektlarning misol sintezi va xarakterlash protokollarida quyida ikki misol laboratoriya protokoli keltiriladi: (A) uglerod kvant nuqtalari (CQDs) sintezi va xarakterlash; (B) SPION (superparamagnetik temir oksid) nanopartikulyalari sintezi va xarakterlash.



A — Uglerod kvant nuqtalari (CQDs) Uglerod asosli prekursoridan (olaq, glukoza yoki citrat) hidrolitik karbonizatsiya yoki microwave yordamida CQDlar olinadi. Reaksiya sharoitlari (temperatura, vaqt, pH) hajm va funksional guruhlarni belgilaydi.

- TEM/SEM: o'lcham va morfologiyani aniqlash (odatda 2–8 nm intervalida).
- DLS: gidrodinamik diametr va PDI.
- UV-Vis va PL: spektral piki va kvant hosildorligi.
- FTIR va XPS: sirt funksional guruhlari (COOH, OH, NHx) va oksidlanish holati.
- TGA/DSC: termal barqarorlik va qoldiq organik moddalar.

Qo'llanilishi ko'plab sohalarda masalan biosensorlar, bioimaging, optoelektronika.

B — SPIONlar (Fe_3O_4 yoki $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) Co-precipitation ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ nisbatida) yoki termal dekompozitsiya metodlari ishlatiladi. Kapsulyatsion uchun surfaktanlar yoki polimerlar qo'llanadi (PEG, dextran).

- TEM/SEM: zarracha o'lchami va agregat holati.
- XRD: kristall faza (magnetit yoki magemit) va don hajmi.
- VSM (Vibrating Sample Magnetometry): magnitlanish xususiyatlari, to'yish magnitlanishi va superparamagnetik xatti-harakat.
- Zeta potensial va DLS: dispersiya va kolloid barqarorlik.
- FTIR/XPS: sirt modifikatsiyasi va kapsulyatsion molekulalar.

MRI kontrast moddalarini, dori yetkazib berish, magnitli ajratish va atrof-muhit tozalashda sorbent sifatida qo'llaniladi. Nanomateriallarning biologik ta'siri, toksikologiyasi va atrof-muhitga ta'siri faol tadqiqot obyekti hisoblanadi. Ularning kichik o'lchami hujayra membranalari orqali kirish, oksidlovchi stressni keltirib chiqarish va to'planish xavfini oshiradi. Shu sababli quyidagi jihatlar muhim. Standart protokollar nanomateriallarning toksikologik va atrof-muhit ta'sirini baholashda o'lchov sharoitlarining standartlashtirilishi natijalarning taqqoslanishi va ishonchlilikini oshiradi. Bunga solventlar (erituvchilar), konsentratsiya darajalari, pH qiymati, temperatura va boshqa parametrlarning bir xil standartlarga muvofiqlashtirilishi kiradi. Masalan, turli tadqiqotlarda bir xil sharoitlar qo'llanilmasa, natijalar orasidagi farqlar haqiqiy toksiklikdan emas, balki metodologik farqlardan kelib chiqishi mumkin.

Toksikologik baholash nanomateriallarning toksikligini to'liq baholash uchun in vitro (hujayra liniyalari va to'qima modellarida) va in vivo (model hayvonlar, masalan, kemiruvchilar yoki baliqlar) tadqiqotlar o'tkaziladi. Ushbu tadqiqotlar orqali biodistributsiya (organizmdagi taqsimlanish), metabolism jarayonlari (parchalanish va o'zgarishlar) va chiqindilarning ta'siri (masalan, jigar va buyrak orqali chiqarilish) aniqlanadi. Bundan tashqari, uzoq muddatli in vivo tadqiqotlar immunotoksiklik, epigenetik o'zgarishlar va surunkali ta'sirlarni o'rganish uchun zarur bo'lib, ular nanomateriallarning genetik materialga ta'sirini va immun javobini baholaydi. Masalan, o'pka ta'siri bo'yicha tadqiqotlarda nanopartikulyalar yallig'lanish va fibrozni keltirib chiqarishi aniqlangan, bu esa inson salomatligiga potensial xavf tug'diradi. Atrof-muhit monitoringi nanomateriallarning chiqindilari suv va tuproq tizimlariga ta'sirini o'rganish uchun kompleks monitoring tizimlari zarur. Bu jarayonda nanopartikulyalarning atrof-muhitdagi xatti-harakati (fate va behavior), bioakkumulyatsiyasi (tirik organizmlarda to'planishi) va bioavailability (biologik mavjudligi) o'rganiladi. Masalan, suv havzalarida nanomateriallarning o'simliklar va suv hayvonlariga ta'siri, shuningdek, tuproqdagi mikroorganizmlar va o'sish jarayonlariga effekti baholanadi. Ushbu monitoring ekologik modellardan foydalangan holda uzoq muddatli prognozlar berishga imkon beradi va ifloslanishning oldini olish strategiyalarini ishlab chiqishga yordam beradi.

Regulyator talablari nanomateriallarning xavfsizligini ta'minlash uchun ISO, OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) va boshqa milliy/xalqaro tashkilotlar tomonidan tavsiya etilgan standartlar asosida xulosa chiqarish zarur. Masalan, ISO 10801 va ISO/TS 12805 kabi standartlar nanomateriallarning toksikologik testlash

usullarini belgilaydi, shuningdek, atrof-muhit xavfsizligi bo'yicha talablarni o'z ichiga oladi. Regulyator organlar, jumladan, nanomateriallarni ro'yxatga olish va baholashni majburiy qiladi, bu esa ularning sanoatda qo'llanilishini nazorat qilishga yordam beradi. Ushbu yondashuvlar ma'lumotlar bazalarini yaratish va xavf-xatarlarni bashorat qilish modellari (masalan, in silico modellar) orqali qo'llab-quvvatlanadi. Ushbu masalalarni hal etish nanomateriallar texnologiyalarining barqaror rivojlanishini ta'minlaydi va ularning ijobiy afzalliklaridan (masalan, tibbiyot va atrof-muhitni tozalashda) maksimal foydalanishga imkon beradi, shu bilan birga potensial xavf-xatarlarni minimallashtiradi. Oxirgi yillarda nanomateriallar bozorining jadal rivojlanishi va ilmiy nashrlardagi faollikning sezilarli darajada ortishi ushbu yo'nalishning strategik ahamiyatini yaqqol ko'rsatmoqda. Masalan, global nanomateriallar bozori 2023-yilda taxminan 12,42 milliard AQSh dollariga baholangan bo'lib, 2030-yilga borib 32,77 milliard dollargacha yetishi bashorat qilinmoqda, bu yillik o'rtacha o'sish ko'rsatkichini (CAGR) 15% ga tenglashtiradi. Boshqa manbalarga asoslanib, 2025-yilda bozor hajmi 47,63 milliard dollarga, 2030-yilda esa 117,83 milliard dollarga yetishi mumkin, CAGR esa 19,86% ni tashkil etadi. Ushbu o'sish nanotexnologiyalarning tibbiyot, energetika, elektronika hamda atrof-muhitni saqlash kabi sohalarda keng tarqalgan qo'llanilishi bilan chambarchas bog'liq bo'lib, pandemiyadan keyingi davrda talabning kuchayishi va innovatsion sarmoyalarning o'sishi bu jarayonni yanada tezlashtirmoqda. Ilmiy nashrlar nuqtai nazaridan, nanomateriallar bilan bog'liq tadqiqotlar soni 2020–2025-yillarda keskin oshgan: masalan, CAS ma'lumotlar bazasiga ko'ra, ushbu mavzudagi hujjatlar soni 3 milliondan oshib ketgan, shu bilan birga nano-dori yetkazib berish bo'yicha 1998–2024-yillarda 2452 ta ilmiy maqola chop etilgan. Ushbu tendensiyalar nanotexnologiyalarning global iqtisodiyot va ilm-fan taraqqiyotidagi markaziy o'rnini ta'kidlaydi, zero ular yangi materiallar sintezi, asbob-uskunalar ishlab chiqarish va ekologik muammolarni yechishda tub o'zgarishlarni ta'minlamoqda.

Quyidagi yo'nalishlar nanomateriallar tadqiqotlarining eng istiqbolli va dinamik rivojlanayotgan sohalari bo'lib, ularning har biri noyob fizikaviy-kimyoviy xususiyatlarga (masalan, yuqori sirt maydoni, kvant effektlari va biokelishuvchanlik) asoslangan holda innovatsion texnologiyalarni taklif etadi. Fokuslangan dori yetkazib berish ushbu sohada maqsadli ligandlar (masalan, antikorlar yoki peptidlar) bilan funksionalizatsiya qilingan nanopartikulyalar (liposomlar, dendrimerlar yoki metall-organik tuzilmalar) orqali aniq davolash effektiga erishiladi. Bu metod dori moddalarini faqat shikastlangan hujayralarga (masalan, saraton hujayralariga) yetkazib berishga imkoniyat yaratadi, shu bilan birga sog'lom to'qimalarga ta'sirni kamaytiradi va yon ta'sirlarni minimallashtiradi. Oxirgi tadqiqotlarda kvant nuqtalar yoki polimer nanopartikulyalari asosidagi tizimlar klinik sinovlarda yuqori natijalarni ko'rsatgan bo'lib, dori moddalarining biologik mavjudligini 50–80% ga oshirishi mumkin. Ushbu yondashuv COVID-19 vaktsinalari va gen terapiyasida allaqachon qo'llanilmoqda, ammo kelgusida shaxsiy tibbiyotda muhim rol o'ynaydi. Energetika uchun nanomateriallar nanostrukturalar yuqori o'tkazuvchanlikdagi elektrodlar (masalan, grafen yoki uglerod nanotrubkalar asosidagi), katalizatorlar (platin nanopartikulyalari) va chidamli superkondensatorlar ishlab chiqarishda ishlatiladi. Masalan, litiy-ion akkumulyatorlarida nanomateriallar energiya zichligini 2–3 baravar oshirishi

mumkin, bu elektr transporti va qayta tiklanadigan energiya saqlash tizimlarining rivojiga yordam beradi. So'nggi yutuqlar perovskit nanomateriallar yordamida quyosh batareyalarining samaradorligini 25% dan yuqori darajaga yetkazishni nazarda tutadi, shu bilan birga ishlab chiqarish xarajatlarini pasaytiradi. Atrof-muhitni tozalash magnetik nanopartikulyalar (masalan, temir oksidi SPIONlari) va funksional membranalar (nanofiberlar yoki nanokompozitlar) orqali suv va havo ifloslanishini bartaraf etish amalga oshiriladi. Ushbu materiallar og'ir metallar, pestitsidlar va organik ifloslantiruvchilarni adsorbsiya qilishga qodir bo'lib, masalan, temir oksidi nanopartikulyalari suv tozalash samaradorligini 90% dan oshirishi mumkin. Ushbu yo'nalish nanotexnologiyaning sanoat chiqindilarini qayta ishlash va ekologik kuzatuvda katta potensialini ta'minlaydi, chunki nanomateriallarning katalitik xususiyatlari fotokataliz va bioremediatsiyani kuchaytiradi. Kvant materiallar va fotonika kvant nuqtalar (masalan, uglerod yoki perovskit asosidagi) va perovskit nanostrukturalar yordamida yangi optoelektronik asboblari (LEDlar, sensorlar va fotodetektorlar) yaratiladi. Ushbu materiallarning o'lchamga bog'liq floresens xususiyatlari yuqori aniqlikdagi tasvirlash va energiya o'zgartirishiga imkon beradi, masalan, kvant nuqtalar biomedikal tasvirlashda qo'llanilganda rangni 3–8 nm hajm oralig'ida o'zgartirish mumkin. Fotonika sohasida bu materiallar kvant hisoblash va yuqori tezlikdagi aloqa tizimlarining rivojlanishida asosiy rol o'ynaydi. Barqaror sintez metodlari yashil kimyo tamoyillariga asoslangan biobazli (o'simlik ekstraktlari yoki mikroorganizmlar orqali) va kam energiya sarflaydigan sintez usullari (masalan, gidrotermal yoki sonokimyoviy metodlar) ishlab chiqilmoqda. Ushbu usullar toksik kimyoviy moddalardan voz kechish va energiya sarfini 50–70% ga kamaytirishga yordam beradi, masalan, o'simlik ekstraktlari yordamida nanomateriallar sintezi atrof-muhitga ta'sirini minimallashtiradi. Ushbu yo'nalish nanotexnologiyalarning barqaror taraqqiyotini ta'minlaydi va sanoat miqyosidagi qo'llanilishini soddalashtiradi. Quyida turli xarakterlash metodlari yordamida olingan tavsifiy natijalar keltiriladi (namuna ma'lumotlari umumiy ko'rinishda bo'lib, haqiqiy tadqiqotlar asosida batafsilroq taqdim etilgan): TEM/SEM ko'rsatkichlari uglerod kvant nuqtalarining (CQD) o'rtacha o'lchami $3,5 \pm 0,8$ nm, superparamagnetik temir oksidi nanopartikulyalarining (SPION) o'lchami esa $12,4 \pm 2,1$ nm ni tashkil etadi, hajm taqsimoti $D_{50} = 12$ nm ga teng. Ushbu parametrlar nanopartikulyalarning monodispersligini va agregatsiya darajasini baholashga imkon beradi, masalan, TEM tasvirlari orqali shakl (shar shaklidagi yoki ellipsoid) va kristall tuzilishi aniqlanadi. XRD odatda SPIONlarda magnetit fazasi (Fe_3O_4) JCPDS standart kartasi bilan yuqori darajada mos keladi, kristall don o'lchami Scherrer formulasiga ko'ra $\approx 10\text{--}15$ nm oralig'ida. Ushbu metod materialning kristallik darajasini (masalan, 80–95% kristallik) va faza aralashmalarini aniqlaydi, ammo amorf komponentlar uchun qo'shimcha tahlillar zarur. BET uglerod nanostrukturalarining sirt maydoni $150\text{--}400$ m²/g oralig'ida bo'lib, bu katalitik va adsorbsiya qobiliyatini belgilaydi. Masalan, grafen asosidagi materiallarda sirt maydoni 500 m²/g dan oshishi mumkin, bu gaz adsorbsiyasi va energiya saqlashda ustunlik yaratadi. TGA funksionalizatsiyalangan CQDlarda organik komponent (masalan, PEG yoki ligandlar) 10–25% massani egallaydi, parchalanish harorati esa 200–400°C oralig'ida. Ushbu metod materialning termal chidamliligini va stabilizatorlar miqdorini baholaydi, shuningdek,

oksidlovchi sharoitdagi o'zgarishlarni ko'rsatadi. Zeta potensial PEG bilan qoplangan SPIONlarda zeta potentsiali -5 mV dan $+15$ mV gacha o'zgaradi, qattiq dispersiya uchun $|\zeta| > 25$ mV tavsiya etiladi. Ushbu ko'rsatkich kolloid tizimlarning barqarorligini belgilaydi, chunki yuqori modul qiymati agregatsiyani oldini oladi va biologik qo'llanilishda biokelishuvchanlikni oshiradi. Ushbu misollar xarakterlash metodlarining bir-birini to'ldiruvchi xususiyatini va nanomateriallar parametrlarini kompleks baholashdagi rolini ko'rsatadi, zero har bir usul ma'lumotlarning aniqligini oshirib, mumkin bo'lgan xatolarni kamaytiradi. Nanomateriallarni xarakterlashda metodlarni birlashtirish — har bir usulning cheklovlarini qoplash va umumiy xulosani mustahkamlash uchun muhimdir. Masalan, dinamik yorug'lik sochilishi (DLS) gidrodinamik diametrni (masalan, $10-100$ nm) va agregatsiya darajasini taqdim etadi, ammo agregatlar mavjud bo'lsa, transmissiv elektron mikroskopiya (TEM) tasvirlari orqali morfologiya va hajm taqsimotini tasdiqlash talab etiladi. Shunga o'xshab, rentgen difraksiyasi (XRD) kristall faza va don o'lchamini aniqlaydi, ammo amorf komponentlar yoki organik qoplama uchun Fur'e-transformatsion infraqizil spektroskopiya (FTIR) yoki termogravimetrik analiz (TGA) qo'shimcha ma'lumot beradi, masalan, bog'lanish turlarini yoki massa yo'qotilishini. Ushbu integratsiyalangan yondashuv nanomateriallarning fizikaviy, kimyoviy va biologik xususiyatlarini to'liq baholashga imkoniyat yaratadi, shu bilan birga tadqiqot natijalarining ishonchliligini oshiradi va sanoat qo'llanilishini tezlashtiradi.

XULOSA

Nanomateriallarning xarakterlash texnologiyalari nanotexnologiya sohasining fundamental va amaliy rivojlanishida markaziy o'rin egallaydi, chunki ular materiallarning o'lcham, morfologiya, kristall struktura, sirt kimyosi, kolloid barqarorlik va termodinamik xususiyatlarini aniq baholashga imkon beradi. Ushbu maqolada muhokama qilinganidek, SEM, TEM, AFM, XRD, FTIR, Raman, DLS, BET, TGA/DSC va XPS kabi ilg'or usullar o'zaro to'ldiruvchi holda ishlatilganda, nanomateriallarning kompleks tavsifini ta'minlaydi va sintez parametrlarini optimallashtirish, reproduksiyani ta'minlash va sanoat miqyosidagi qo'llanilishini osonlashtiradi. Xususan, uglerod kvant nuqtalari va SPIONlar kabi misollar nanotexnologiyalarning biomeditsina (fokuslangan dori yetkazib berish, bioimaging), energetika (batareyalar, katalizatorlar), ekologiya (tozalash va monitoring) va elektronika (optoelektronika, sensorlar) sohalardagi istiqbolli qo'llanilishini ko'rsatadi. Shu bilan birga, nanomateriallarning toksikologik va atrof-muhit ta'sirini baholashda in vitro/in vivo tadqiqotlar, standart protokollar (ISO va OECD tamoyillari) va monitoring tizimlarining muhimligi ta'kidlanadi, bu esa xavfsizlik va barqarorlikni ta'minlashga yo'naltirilgan. So'nggi yillarda bozorning tez o'sishi (2023–2030-yillarda CAGR $15-20\%$ oralig'ida) va ilmiy nashrlarning ko'payishi nanotexnologiyalarning global iqtisodiyotdagi rolini kuchaytirib, yashil sintez metodlari va kvant materiallari kabi yo'nalishlarni oldinga surmoqda. Ushbu soha kelgusida integratsiyalangan yondashuvlar orqali innovatsion yechimlarni taklif etadi, ammo xavf-xatarlarni bashorat qilish va regulyatoriy nazoratni kuchaytirish zarur bo'lib qoladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Akbarov, Kh. I., & Kadirov, A. A. (2022). Synthesis and characterization of hybrid polysaccharide-silica nanocomposites via sol-gel method: Structure-property relationships. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 103(2), 123–135. <https://doi.org/10.1007/s10971-022-05816-x> (O'zbek olimi Akbarov Kh.I. ning O'zbekiston Milliy universitetidagi tadqiqotlari: organik-inorganik gibrid nanomateriallar sintezi va fizikaviy-kimyoviy xususiyatlarini xarakterlash).
2. Binnig, G., & Rohrer, H. (1986). Scanning tunneling microscopy—from birth to adolescence. *Reviews of Modern Physics*, 58(3), 615–625. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.58.615> (AFM va SEM texnologiyalarining rivojlanishi va nanomateriallarni xarakterlashdagi dastlabki ishlar uchun).
3. Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309–319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023> (BET sirt maydoni tahlili metodologiyasining asosiy manbasi).
4. International Organization for Standardization. (2015). ISO/TS 80004-1:2015: Nanotechnologies—Vocabulary—Part 1: Core terms. ISO. (Nanomateriallar terminologiyasi va standartlashtirish bo'yicha xalqaro hujjat).
5. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2010). OECD Guidelines for the Testing of Chemicals: Nanomaterials. OECD Publishing. (Nanomateriallarning toksikologik testlash standartlari va atrof-muhit ta'siri bo'yicha yo'riqnomalar).
6. Oberdörster, G., Oberdörster, E., & Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 823–839. <https://doi.org/10.1289/ehp.7339> (Nanomateriallarning toksikologik ta'siri va atrof-muhit xavfsizligi bo'yicha muhim tadqiqot).
7. Zhang, Y., & Yang, W. (2019). Carbon quantum dots: Synthesis, properties, and applications. *Chemical Reviews*, 119(6), 3968–4005. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00729> (Uglerod kvant nuqtalari sintezi va xarakterlash bo'yicha umumiy ma'lumot).
8. Laurent, S., Forge, D., Port, M., Roch, A., Robic, C., Vander Elst, L., & Muller, R. N. (2008). Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications. *Chemical Reviews*, 108(6), 2064–2110. <https://doi.org/10.1021/cr068445e> (SPIONlar sintezi, xarakterlash va biomedikal qo'llanilishi bo'yicha asosiy manba).
9. Nel, A. E., Mädler, L., Velegol, D., Xia, T., Hoek, E. M. V., Somasundaran, P., & Thompson, M. (2009). Understanding biophysicochemical interactions at the nano-bio interface. *Nature Materials*, 8(7), 543–557. <https://doi.org/10.1038/nmat2442> (Nanomateriallarning biologik ta'siri va biofizikaviy o'zaro ta'sirlari).



10. MarketsandMarkets. (2023). Nanomaterials Market by Material Type, End-Use Industry, and Region—Global Forecast to 2030. MarketsandMarkets Research Pvt. Ltd. (Nanomateriallar bozori o'sishi va prognozlari bo'yicha hisobot).