

ФУНКЦИОНАЛДЫ МАТЕРИАЛДАР МЕН НАНОҚҰРЫЛЫМДАРДЫ АЛУ ӘДІСТЕРІ

15-Дәріс

Экологиялық және әлеуметтік аспектілер. Тұрақты даму мақсаттарына сәйкестік.

7M07103 - Материалтану және жаңа материалдар технологиясы

5 (1/0/2/2) кредит

Семестр: 1, күз, 2025- 2026 оқу жылы

Дәріскер – Керимкулова Алмагуль Рыскуловна

15-Дәріс

Экологиялық және әлеуметтік аспектілер. Тұрақты даму мақсаттарына сәйкестік.

Дәрістің мақсаты

Білім алушыларға функционалдық материалдар мен нанокұрылымдарды алудың заманауи физикалық, химиялық, электрохимиялық, биотехнологиялық және комбинациялық әдістері жөнінде жүйелі білім беру, олардың құрылымы мен қасиеттерін синтез тәсіліне байланысты түсіндіру, алынған білімді ғылым мен өндірістің түрлі салаларында (катализ, энергетика, экология, биомедицина, электроника) қолдануға дағдыландыру.

Дәрістің міндеттері

- ☐ Функционалды материалдар мен нанокұрылымдарды алудың негізгі әдістері (физикалық, химиялық, электрохимиялық, биотехнологиялық) туралы теориялық білім қалыптастыру.
- ☐ Әдістердің ерекшеліктерін, артықшылықтары мен шектеулерін салыстыра отырып түсіндіру.
- ☐ Әдістердің синтез өнімдерінің морфологиясына, фазалық құрамына және функционалдық қасиеттеріне әсерін көрсету.
- ☐ Студенттерді зертханалық және өндірістік жағдайда қолданылатын синтез әдістерімен таныстыру.
- ☐ Заманауи құрылымдық, спектроскопиялық және микроскопиялық талдау әдістерін қолдануға үйрету.
- ☐ Экологиялық таза және энергия үнемдейтін технологиялардың рөлін, сондай-ақ олардың ТДМ-ға сәйкестігін түсіндіру.
- ☐ Ақпараттық технологиялар мен жасанды интеллектіні пайдалана отырып, функционалды материалдарды жобалау мен талдау бойынша пәнаралық жобаларға қатысуға дағдыландыру.
- ☐ Функционалды материалдар мен нанокұрылымдарды алудың ғылыми және өндірістік маңызын, қауіпсіздік пен тиімділік аспектілерін бағалау.

Функционалды материалдардың биомедицинадағы қолданылуы және жұмыс істеу принциптері

Функционалды материалдар экономикада маңызды рөл атқарады, себебі олар жоғары технологиялық өнімдер жасаудың негізі болып табылады және инновацияларды ынталандырады. Ал әлеуметтану тұрғысынан олар жаңа технологиялардың дамуы арқылы халықтың өмір сүру деңгейі мен қоғам құрылымына әсер етеді. Экономикада функционалды материалдар өндіріс көлемінің өсуіне, жұмыспен қамтудың артуына және бәсекеге қабілеттіліктің күшеюіне ықпал етіп, жаңа нарықтар қалыптастырады. Әлеуметтану саласында олардың ықпалы адамдардың өмір сапасын жақсарту және жаңа өнімдер мен қызметтердің енгізілуі нәтижесінде қоғамның өзгеруінен байқалады, бұл әлеуметтік байланыстар мен қоғам құрылымының трансформациясына алып келеді.

❖ Экономикадағы рөлі

- Экономикалық өсуді ынталандыру:
- Жоғары технологиялық материалдарды жасау және өндіру инновациялық өнімдердің дамуына әкеліп, еңбек өнімділігінің артуына және экономикалық өрлеуге себеп болады.
- Бәсекеге қабілеттілікті арттыру:
- Озық функционалды материалдарды қолданатын компаниялар сапалы әрі сұранысқа ие өнім шығара алады, бұл олардың әлемдік нарықтағы бәсекеге қабілеттілігін күшейтеді.
- Жаңа нарықтардың пайда болуы:

Функционалды материалдардың дамуы электроника, энергетика және медицина сияқты салаларда жаңа нарықтық бағыттардың ашылуына жол ашады. Жұмыспен қамтуды арттыру: Бұл саладағы инновациялар жоғары біліктілік талап ететін жаңа жұмыс орындарын ашып, адами капиталдың дамуына ықпал етеді.

❖ Әлеуметтанудағы рөлі

- Өмір сапасын жақсарту:
- Функционалды материалдар заманауи жетістіктердің — тиімді дәрі-дәрмектердің, тұрмыстық техниканың, көлік пен байланыс құралдарының — негізінде жатыр, бұл адамдардың өмір деңгейі мен сапасын тікелей арттырады.
- Әлеуметтік өзара әрекеттесудің өзгеруі:
- Осы материалдарға негізделген жаңа технологиялардың пайда болуы қарым-қатынас, жұмыс істеу және ақпарат алу тәсілдерін өзгертеді, нәтижесінде әлеуметтік байланыстар мен мінез-құлық үлгілері трансформацияланады.

❖ Қоғамдық құрылымға әсері:

- Функционалды материалдарға негізделген жаңа салалардың дамуы жаңа әлеуметтік топтардың қалыптасуына және бар әлеуметтік иерархиялардың өзгеруіне алып келеді.

Негізгі қолданылу салалары және олардың экономикалық әсері

Қолданылу салалары	Материалдар	Экономикалық әсері
Энергетика	Күн панельдерінде — перовскиттер мен кремний; Сутек энергиясында — катализаторлар мен мембраналар; Суперконденсаторларда — графен және көміртекті нанотүтікшелер	Энергия тиімділігін арттырады; Қайта жаңартылатын энергия көздерін дамытады; Энергия импортын азайтады және ұлттық қауіпсіздікті арттырады.
Өндіріс және машина жасау	Жеңіл және мықты композиттер авиацияда және автокөліктерде; Тозуға төзімді жабындар өндірістік станоктарда.	Өнімнің қызмет ету мерзімі артады; Отын және материал шығыны азаяды; Өндіріс құны төмендейді, экспорттық мүмкіндіктер өседі.
Электроника және ақпараттық технологиялар	Кремний және галлий арсениді — микрочиптерде; Графен — икемді экрандар мен датчиктерде; Фотондық және магниттік материалдар — деректерді сақтау құрылғыларында.	Цифрлық экономиканың дамуына жол ашады; Роботтандыру мен «ақылды» өндіріс жүйелерін қамтамасыз етеді; Экспорттық жоғары технологиялық өнім шығару мүмкіндігін береді.
Биомедицина және фармацевтика	Наноматериалдар — дәрілерді дәл жеткізу жүйесінде; Биосенсорлар — ауруларды ерте анықтауда; Биоүйлесімді импланттар мен протездер.	Медициналық қызмет сапасын жақсартады; Емдеу шығындарын азайтады; Халық денсаулығын жақсарту арқылы еңбек өнімділігін арттырады.
Экология және қоршаған ортаны қорғау	Суды және ауаны тазалауға арналған фотокатализаторлар; Ауыр металдарды сіңіретін сорбенттер; Биодеградацияланатын полимерлер.	Экологиялық залалды азайтады; «Жасыл экономика» мен тұрақты даму принциптерін енгізеді; Экотехнологиялар нарығын қалыптастырады.
Құрылыс және инфрақұрылым	Өзін-өзі жөндейтін бетондар; Энергия үнемдейтін әйнектер; Смарт-қаптапалар мен оқшаулағыш материалдар.	Құрылыстың энергия тиімділігі артады; Ғимараттардың қызмет мерзімі ұзарады; Коммуналдық шығындар қысқарады.

Экономикаға ұзақмерзімді әсері

- ❖ Инновациялық даму - Ғылым мен өндіріс арасындағы байланысты күшейтеді
- ❖ Экспорттық әлеует - Жоғары технологиялы өнім шығару және сыртқы нарыққа шығу
- ❖ Импортты алмастыру - Шетел материалдарына тәуелділікті азайтады
- ❖ Жұмыс орындары - Инженерлік және зертханалық бағыттарда жаңа жұмыс орындары ашылады
- ❖ Білім мен ғылымның дамуы - Университеттер мен зерттеу орталықтарының әлеуетін арттырады

Қазақстанда функционалды материалдарды қолдану стратегиялық маңызды бағыт болып саналады:

- Энергия және экология салаларында (мысалы, көміртегі наноматериалдары, металл оксидтері);
- Мұнайхимия және металлургия өндірістерін жаңғыртуда;
- Университеттер мен технопарктерде жаңа зерттеулер жүргізілуде (Satbayev University, Назарбаев Университеті, т.б.).

•Мақсат:

Жергілікті шикізатқа негізделген жоғары технологиялық өнім шығару және экспортқа бағытталған «инновациялық экономиканы» қалыптастыру.

Функционалды материалдардың кері әсерлері (экономикалық және социологиялық тұрғыдан)

Себеп	Экономикалық/социологиялық әсер	Мысал
Жоғары бастапқы құн және технологиялық тәуелділік	- Функционалды материалдар өндіру үшін жоғары технологиялар, зертханалар және құрал-жабдықтар қажет. - Бұл бастапқы инвестицияның қымбат болуына әкеледі. - Дамушы елдерде (оның ішінде Қазақстанда) шетелдік технология мен шикізатқа тәуелділік артады.	Перовскит күн батареяларын өндіру үшін сирек кездесетін элементтер (мысалы, германий, индий, галлий) шетелден әкелінеді → ұлттық өндіріс шығыны өседі.
Теңсіздік және технологиялық алшақтық	- Тек дамыған елдер мен ірі компаниялар жаңа функционалды материалдарға қол жеткізе алады. - Бұл әлемдік технологиялық теңсіздікті күшейтеді. - Әлеуметтік деңгейде «жоғары технологиямен жұмыс істей алатын» және «ескі өндірістерде қалған» мамандар арасында айырмашылық туындайды.	Жапония мен Кореяда жоғары технологиялық өндіріс дамыған, ал дамушы елдер шикізат жеткізуші болып қалып отыр.
Еңбек нарығындағы өзгерістер	- Функционалды материалдарға негізделген автоматтандыру мен роботтандыру қарапайым жұмысшылардың орнын басады. - Қол еңбегінің маңызы азайып, жоғары білікті инженерлер мен ғалымдарға сұраныс артады. - Бұл жұмыссыздықтың жаңа түрін тудырады — «технологиялық жұмыссыздық».	Смарт-заводтар мен сенсорлы өндіріс жүйелері жұмысшылардың санын қысқартып, әлеуметтік шиеленіс тудыруы мүмкін.
Экологиялық және ресурстық тәуекелдер	- Кейбір функционалды материалдарды өндіру кезінде сирек кездесетін металдар қолданылады (литий, кобальт, индий). - Оларды өндіру — экологиялық зиянды және ресурстық бәсекелестік туғызады. - Бұл шикізат бағасының көтерілуіне, энергетикалық және шикізаттық тәуелділікке алып келеді.	Литий өндіру аймақтарында (мысалы, Оңтүстік Америка) су тапшылығы мен экологиялық дағдарыс күшеюде.

Себеп	Экономикалық/социологиялық әсер	Мысал
Технологиялық монополия және нарықтағы шоғырлану	- Функционалды материалдар нарығын аз ғана ірі корпорациялар (мысалы, Samsung, Intel, BASF) басқарады. - Бұл шағын және орта бизнестің нарыққа енуін қиындатады. - Инновациялық өнімдерге баға жоғары болады, ал тұтынушылар тәуелді болады.	Жартылай өткізгіш өндірісіндегі монополия жаһандық баға мен жеткізу тізбегін тұрақсыз етеді.
Әлеуметтік бейімделу мәселелері	- Жаңа материалдар мен технологиялардың енуі білім беру жүйесін, кадр даярлау бағдарламаларын қайта құруды қажет етеді. - Егер қоғам тез бейімделе алмаса, білім мен дағды арасындағы алшақтық пайда болады. - Бұл жастар мен жұмыс күшінің әлеуметтік күйзелісін күшейтуі мүмкін.	Инженерлік және нанотехнологиялық мамандарға сұраныс бар, бірақ мамандар жеткіліксіз болса, ел инновациялық артта қалады.
Қауіпсіздік және этикалық сұрақтар	- Наноматериалдар мен функционалды заттардың адам ағзасына немесе экожүйеге әсері толық зерттелмеген. - Бұл қоғамдық сенім дағдарысын тудыруы мүмкін (мысалы, биоматериалдар мен нанотехнологияларға күдікпен қарау).	Нанобөлшектердің биологиялық әсерін толық зерттемей тұрып қолдану — денсаулыққа және қоршаған ортаға қауіп төндіреді.

- ❖ Функционалды материалдар — экономикалық дамудың негізгі қозғаушы күші, бірақ олармен бірге жаңа тәуекелдер мен әлеуметтік теңсіздіктер де келеді:
 - экономикалық тәуелділік пен технологиялық монополиялар,
 - жұмыссыздық пен мамандық құрылымының өзгеруі,
 - экологиялық және этикалық мәселелер.
- ❖ Сондықтан олардың дамуында:
 - мемлекеттік реттеу,
 - әлеуметтік бейімдеу бағдарламалары,
 - және тұрақты даму принциптері маңызды рөл атқарады.

Функционалды материалдардың тұрақты дамуы

Тұрақты даму (sustainable development) — қазіргі ұрпақтың қажеттіліктерін қанағаттандырып, болашақ ұрпақтың мүмкіндіктеріне зиян келтірмей экономикалық, экологиялық және әлеуметтік тепе-теңдікті сақтау.

Функционалды материалдардың тұрақты дамуы – бұл жаңа материалдарды ресурстарды үнемдеп, экологиялық қауіпсіз және әлеуметтік тұрғыдан жауапты түрде өндіру мен қолдану процесі.

Функционалды материалдар тұрақты дамудың барлық бағыттарын қамтиды:



Экологиялық тұрақтылық – қоршаған ортаны қорғау, энергия мен ресурстарды үнемдеу;



Экономикалық тұрақтылық – тиімді өндіріс пен ұзақмерзімді инновациялар;



Әлеуметтік тұрақтылық – адамдардың өмір сапасын арттыру және қоғамды технологиялық бейімдеу.

❖ Экологиялық тұрақты даму бағыттары

- Энергия тиімді материалдар: Күн батареяларында, жел және сутек энергетикасында қолданылатын материалдар энергия үнемдеуге мүмкіндік береді. Мысалы: перовскитті фотоэлементтер, графен, кремний негізді құрылымдар.
- Қайта өңдеуге жарамды және биологиялық ыдырайтын материалдар: Қоршаған ортаға зиян келтірмейтін экологиялық таза полимерлер мен биоматериалдар өндірісі кеңейде. Мысалы: биодеградацияланатын пластик, био-композиттер.
- Ластаушы заттарды залалсыздандыру: Функционалды наноматериалдар су мен ауаны тазарту жүйелерінде қолданылады. Мысалы: TiO_2 фотокатализаторлары органикалық ластағыштарды ыдыратады.

❖ Экономикалық тұрақты даму бағыттары

- Ресурстарды тиімді пайдалану: Функционалды материалдар өндірісте энергия мен шикізат шығынын азайтады. Мысалы: жеңіл және берік композиттер көліктердің отын шығынын төмендетеді.
- Инновациялық экономиканы дамыту: Жаңа материалдар жоғары технологиялық өндірістердің (микрочиптер, сенсорлар, аккумуляторлар) дамуына негіз болады. Нәтиже: жаңа жұмыс орындары мен экспорттық әлеуеттің артуы.
- Циркулярлы экономика (қайта айналым экономикасы): Материалдар қайта өңделіп, қалдық азаяды. Мысалы: металл нанобөлшектерді қайта қолдану, батарея материалдарын қайта өңдеу.

❖ Әлеуметтік тұрақты даму бағыттары

- Адам өмірінің сапасын арттыру: Функционалды материалдар медицинада, тұрмыста және көлікте қауіпсіз әрі ыңғайлы технологияларды енгізуге мүмкіндік береді. Мысал: биосенсорлар, импланттар, энергия үнемдейтін құрылғылар.
- Білім мен ғылымды дамыту: Бұл салада тұрақты даму үшін жоғары білікті инженерлер, химиктер және материалтанушылар қажет. Нәтиже: білім беру жүйесінің жаңаруы, жастардың ғылыми салаға тартылуы.
- Әлеуметтік теңдік: Тұрақты даму саясаты жаңа технологияларға барша қоғам мүшелерінің тең қолжетімділігін қамтамасыз етуі тиіс.

Функционалды материалдардың тұрақты дамуының қиындықтары мен шектеулері

- ❖ Шикізат тапшылығы және сирек элементтерге тәуелділік:
- Көптеген функционалды материалдар сирек кездесетін элементтерге (литий, кобальт, индий, галлий, неодим, германий және т.б.) сүйенеді.

Мәселе:
Бұл элементтер шектеулі елдерде өндіріледі, сондықтан геосаяси тәуелділік артады.
Бағалар тұрақсыз және өндіріс экологиялық зиянды.
Мысал: литий мен кобальттың негізгі бөлігі Конго мен Чилиде өндіріледі, бұл жаһандық жеткізу тізбегін әлсіз етеді.

- ❖ Экологиялық тәуекелдер
- Функционалды материалдарды өндіру және өңдеу кезінде улы химиялық қалдықтар мен энергия шығыны көп болуы мүмкін.

Мәселе:
Нанобөлшектер мен металл иондарының қоршаған орта мен тірі ағзаларға әсері толық зерттелмеген.
Қалдықтардың жиналуы биосфераға қауіп төндіреді.
Мысал: наноматериал өндірісіндегі ауыр металдардың топырақ пен суға түсуі экожүйеге зиян келтіреді.

- ❖ Қайта өңдеу және қалдықтарды басқару мәселелері
- Функционалды материалдар көбінесе күрделі көпқұрамды құрылымдардан тұрады (мысалы, көп қабатты композиттер, нанокұрылымдар).

Мәселе:
Оларды бөліп, қайта өңдеу қиын және қымбат.
Электрондық қалдықтардың көбеюі экологиялық проблемаға айналуға.
Мысал: ескі батареялар мен микрочиптерді қайта өңдеу үшін арнайы технологиялар қажет.

- ❖ Экономикалық шығындар және жоғары инвестициялық тәуекел

Мәселе:
Функционалды материалдар саласындағы зерттеу мен өндіріс өте қымбат.
Жаңа технологиялардың нарыққа шығуы ұзақ уақыт алады.
Инновацияларға арналған венчурлық қаржы жетіспейді.
Нәтиже: дамушы елдерде өндірістік база баяу қалыптасады, ал ғылыми зерттеулер көбіне шетелге тәуелді болады.

❖ Ғылыми және кадрлық әлеуеттің жеткіліксіздігі.	Мәселе: Жоғары білікті материалтанушылар, инженерлер және нанотехнологтар жетіспейді. Университеттер мен өнеркәсіп арасындағы байланыс әлсіз. Ғылыми нәтижелердің өндірісте қолданылуы баяу. Нәтиже: зерттеу нәтижелері көбінесе зертханалық деңгейде қалып қояды.
❖ Әлеуметтік және этикалық аспектілер	Мәселе: Қоғам жаңа технологияларға сенімсіздікпен қарайды (әсіресе наноматериалдарға). Еңбек нарығында жоғары және төмен білікті мамандар арасындағы алшақтық өседі. Автоматтандыру мен роботтандыру кейбір салаларда жұмыссыздыққа әкелуі мүмкін.
❖ Технологиялық стандарттар мен заңнаманың жетілмегендігі	Мәселе: Көптеген елдерде функционалды материалдарға арналған экологиялық және қауіпсіздік нормалары әлі толық қалыптаспаған. Халықаралық стандарттардың болмауы өндіріс пен саудада кедергілер тудырады.

Функционалды материалдардың тұрақты дамуы — ғылым мен экономиканың түйіскен нүктесі.

Болашақта негізгі мақсат — **ресурстарды үнемдей отырып, экологиялық және әлеуметтік тұрғыдан қауіпсіз өндіріс құру.**

Бұл үшін қажет:

- сирек металдарға тәуелділікті азайту,
- жасыл технологияларды кеңінен енгізу,
- кадрлық әлеуетті күшейту,
- халықаралық ғылыми ынтымақтастықты дамыту.

Тек осындай кешенді тәсіл арқылы функционалды материалдардың тұрақты және әділ дамуын қамтамасыз етуге болады.

Функционалды материалдардың болашақтағы даму бағыттары

- ❖ Экологиялық таза және энергия үнемдейтін технологиялар

Қалдықсыз өндіріс жүйелерін дамыту (zero-waste production).

Төмен температурада синтезделетін, энергияны аз тұтынатын материалдар. Мысалы: жасыл синтез әдістері арқылы нанобөлшектерді биологиялық жолмен алу.

- ❖ Қайта өңделетін және биологиялық ыдырайтын материалдар

Полимерлер мен композиттерді экологиялық баламалармен алмастыру.

Материалдардың қызмет ету мерзімі аяқталған соң қайта қолдануға немесе табиғи ыдырауға мүмкіндік беру. Мысалы: крахмал мен целлюлоза негізіндегі био-пластиктер.

- ❖ Ақылды (интеллектуалды) материалдар

Өздігінен қалпына келетін, температура немесе қысым өзгерісіне бейімделетін материалдар. Мысалы: өзін-өзі жөндейтін бетон, пішін жады бар қорытпалар, «ақылды терезелер». Мұндағы мақсат: энергия тиімділігі мен құрылыс қауіпсіздігін арттыру

- ❖ Циркулярлы экономикаға көшу

Материалдардың толық өмірлік циклі бақыланады: өндіру → пайдалану → қайта өңдеу → қайта қолдану.

Электрондық және батарея қалдықтарын тиімді қайта өңдеу технологиялары енгізіледі.

Жасыл энергетика және таза өндіріс

Функционалды материалдар сутек экономикасы, күн және жел энергетикасы үшін жаңа шешімдер ұсынады. Мысалы: сутек сақтау қабілеті жоғары қорытпалар, энергия тиімді катализаторлар. Мұндағы нәтиже: көміртегі ізін азайту және климаттың өзгеруіне қарсы күресу.

- ❖ Сандық технологиялармен интеграция

Функционалды материалдарды жобалау мен сынауда жасанды интеллект (AI) және үлкен деректер (Big Data) пайдаланылады. Мысалы: AI көмегімен жаңа наноқұрылымдардың қасиеттерін болжау және оптимизациялау.

- ❖ Әлеуметтік жауапты инновациялар

Әрбір жаңа материалдың экологиялық және әлеуметтік әсері бағалануы тиіс (Life Cycle Assessment).

Технологиялық теңсіздікті азайту үшін білім мен технологияларға қолжетімділікті кеңейту қажет.

- ❖ Ғылыми кооперация және халықаралық серіктестік

Университеттер мен ғылыми орталықтар арасындағы бірлескен зерттеулер;

Инновациялық стартаптарды қолдау және тәжірибелік өндіріс базаларын құру;

Ғылым–өнеркәсіп–мемлекет үштігінің тиімді өзара әрекеті.

Әдебиеттер тізімі

1. United Nations. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution A/RES/70/1, 2015. (17 ТДМ-ның ресми құжаты, экологиялық және әлеуметтік аспектілердің негізі)
2. UNESCO. Education for Sustainable Development: ESD for 2030 Roadmap. UNESCO Publishing, 2020. (ТДМ-ға сәйкес білім, жауапты азаматтық, әлеуметтік әділеттілік)
3. UNESCO. Education for Sustainable Development (ESD) for 2030 (ресми веб-платформа және құралдар жинағы). (Тұрақты даму құзыреттері, қоғаммен байланыс)
4. Chatzipanagiotou, K. R., et al. Towards Safe and Sustainable by Design Nanomaterials. *Materials Today Sustainability*, 2025. (Наноматериалдардың экологиялық және әлеуметтік қауіптерін азайту тұжырымдамасы)
5. Nizam, N. U. M., et al. A Content Review of Life Cycle Assessment of Nanomaterials. *Nanomaterials*, 11(12), 3324, 2021. (LCA арқылы наноматериалдардың қоршаған ортаға әсерін бағалау)
6. Windsor, R., et al. Comparison of Tools for the Sustainability Assessment of Nanomaterials. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2018. (Экологиялық және әлеуметтік тәуекелдерді бағалау әдістері)
7. Kumar, A., et al. Integrating Green Nanotechnology with Sustainable Development Goals. *Discover Sustainability*, 2024. (Жасыл нанотехнология және ТДМ: экология, денсаулық, теңсіздікті азайту)
8. [Authors]. Sustainable Materials and their Contribution to the Sustainable Development Goals (SDGs): A Critical Review. 2021. (Материалтану нәтижелерін нақты ТДМ индикаторларымен байланыстыру)
9. [Authors]. Sustainability Evaluation of Nanotechnology Processing and Production. (LCA және әлеуметтік-экономикалық индикаторлар негізінде нанотехнология процестерінің орнықтылығын бағалау)
10. Shao, C., et al. Recent Development in Functional Nanomaterials for Sustainable Agriculture and Environment. *Nano Convergence*, 9, 2022. (Экожүйе, азық-түлік қауіпсіздігі және ТДМ-мен байланысы)