

ЕЛНАР ЕРДЕШ БАҚЫТХАНҰЛЫ

Төрт жылу резервуары бар жер жылу сорғысы жүйелерін термодинамикалық оңтайландыру

«8D05403 – Механика» білім беру бағдарламасы бойынша
философия докторы (PhD) дәрежесін алуға арналған диссертация
АНДАТПАСЫ

Зерттеу жұмысының өзектілігі. Суық әрі құрлықтық климат жағдайларында (мысалы, Қазақстанда) ғимараттарды жылыту – энергия мен көміртек шығыны ең жоғары салалардың бірі. Қазіргі уақытта жылыту жүйелерінің басым бөлігі көмір мен газ қазандықтарына тәуелді, бұл өз кезегінде CO₂ шығарындыларын арттырып, қалалық ауаның ластануына әкеледі. Сонымен қатар, қыстағы үлкен температуралық айырмашылықтар жүйелердің тиімділігін төмендетеді.

Жер жылу сорғылары (ЖЖС) тұрақты жер асты температураларының арқасында энергия тиімді әрі көміртексіз жылыту жолдарының бірі болып саналады. Алайда олардың кеңінен енгізілуі бұрғылау жұмыстарының жоғары құнына, маусымдық жылу теңгерімінің бұзылуына және жүйе элементтерінің – хладагент, жылуалмастырғыш өлшемдері мен жұмыс температураларының – өзара тығыз байланысына байланысты шектеліп отыр.

Ғылыми тұрғыдан алғанда, бұл тақырып өзекті, себебі қазіргі әдебиеттерде жүйелік деңгейдегі термодинамикалық теория әлі толық қалыптаспаған. Көптеген зерттеулер жеке компоненттерді қарастырады немесе идеалдандырылған, стационарлы модельдерге сүйенеді. Нәтижесінде жылуалмастырғыш пен жылу сыйымдылық ресурстарын көздер мен тұтынушылар арасында қалай тиімді бөлу керектігі туралы нақты түсінік қалыптаған. Мұндай тұғырнама болмаған жағдайда жобалаушылар температураға сәйкес тиімділіктің (COP) төмендеуін, жылуалмастырғыш тиімділігі дұрыс анықтай алмайды және ұзақ мерзімді жердің салқындауын шектеуге арналған сенімді жобалау ережелерін жасай алмайды.

Практикалық тұрғыдан алғанда, бұл зерттеу – саясаткерлер мен инженерлерге нақты климаттық жағдайларға бейімделген, сенімді әдістемелік нұсқаулықтар әзірлеу үшін маңызды. Төмен GWP хладагенттерін таңдау, бұрғылау тереңдігі мен жұмыс температураларын анықтау – тек тиімділік пен сенімділікке ғана емес, сонымен қатар экологиялық әсерге (мысалы, TEWI көрсеткіші) тікелей ықпал етеді. Ұзақ әрі суық қысы бар құрлықтық аймақтарда дәлелденген ЖЖС-ның термодинамикалық және экологиялық критерийлері инвестициялық тәуекелдерді азайтуға, шектеулі капиталды (мысалы, жылуалмастырғыш ауданын) оңтайлы үлестіруге және декарбонизация стратегияларына сәйкес шығарындыларды азайтуға мүмкіндік береді.

Зерттеу жұмысының мақсаты – құрлықтық климат жағдайларында жер жылу сорғысы (ЖЖС) жүйелерін термодинамикалық оңтайландырудың

теориялық және әдістемелік негіздерін әзірлеу. Бұл мақсатқа шектеулі уақыт термодинамикасы (finite time thermodynamics, FTT) модельдерін, 3Е талдауын (энергетикалық, эксергетикалық, экологиялық) және тәжірибелік деректер арқылы модельді растауды біріктіру негізінде қол жеткізіледі.

Зерттеу міндеттері:

- Төрт жылуалмастырғышы бар жер жылу сорғылары (ЖЖС) үшін шекті уақыт термодинамикасына (FTT) негізделген оңтайландыру тұғырнамасын құру.
- Жүктелген жұмыс жағдайлары үшін көп айнымалы оңтайландыру есептерін құрастыру.
- Жылуалмастырғыштың тиімділігі, жылу сыйымдылықтарының арақатынасы және қайтымсыздық дәрежесі бойынша параметрлік талдау жүргізу.
- Алматы қаласындағы тәжірибелік ЖЖС деректерін пайдалана отырып, 3Е (энергиялық, эксергиялық, экологиялық) талдау әдістемесін әзірлеу және растау.
- Құрлықтық климат жағдайларында қолдануға арналған жобалау және пайдалану бойынша әдістемелік ұсынымдар әзірлеу.

Зерттеу нысаны – құрлықтық климат жағдайында ғимаратты жылытуға арналған жер жылу сорғылары (ЖЖС) жүйелері.

Зерттеу пәні – жылу сорғысы жүйелерінің термодинамикалық оңтайландыру: қайтымсыздықтар әсерін, жылуалмастырғыш ресурстарын бөлу принциптерін, хладагентті таңдауды және тиімділік-экологиялық көрсеткіштер арасындағы өзара байланыстарды ескере отырып зерттеу.

Зерттеу әдісі – ЖЖС жұмысын оңтайландыруға бағытталған шекті уақыт термодинамикасы (FTT) моделдеуі мен энергия-эксергетикалық талдауын, экологиялық бағалауын қамтиды. Оған сандық модельдеу, тәжірибелік сынақтар мен алынған нәтижелерді өлшенген деректер және жарияланған зерттеулермен салыстырып тексеру кіреді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы:

1. Төрт жылуалмасу беті бойынша цикл-резервуар байланысын жүйелік деңгейде қарастыратын жер жылу сорғылары (ЖЖС) үшін бірыңғай шекті уақыт термодинамикасы (FTT) тұғырнамасы ұсынылды.
2. Берілген шектеулі жағдайларда (атап айтқанда, берілген жылу алу және жылу өндіру қарқындары) жұмыс істеуге арналған жаңа оңтайландыру критерийлері әзірленді.
3. Жылу насосы қайтымсыздығын сипаттайтын модель арқылы жылуалмастырғыш тиімділігі мен жылу сыйымдылықтарының оңтайлы бөліну ережелері анықталды.
4. Құрлықтық климат жағдайындағы тәжірибелік деректер негізінде расталған 3Е (энергия, эксергия, экология) кешенді талдауы орындалды.
5. Суық және құрлықтық климаттарға бейімделген хладагентті таңдауға, жылуалмастырғыш өлшемдері мен жұмыс температураларын анықтауға арналған әмбебап жобалау қағидалары анықталды.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы.

Бұл жұмыс жер жылу сорғыларының термодинамикалық оңтайландыруын жетілдіріп, шекті уақыт термодинамикасы (ФТТ) негізінде қайтымсыздықтар мен шекті жылу алмасуды нақты қарастырады. Нәтижесінде жылу алу/өндіру жағдайлары үшін жаңа критерийлер және жылуалмастырғыш тиімділігі мен жылу сыйымдылығын бөлу ережелері әзірленді. Алматыдағы тәжірибелік деректермен расталған ЗЕ (энергия-эксергия-экология) талдауымен біріктірілген бұл тәсіл жүйелік деңгейде бірыңғай әдістемені ұсынады. Практикалық тұрғыдан, нәтижелер жылуалмастырғыш өлшемдерін, төмен GWP хладагенттерін және жұмыс температураларын таңдауға нақты нұсқаулар береді – бұл COP-ты арттырып, CO₂ шығарындылары мен шығындарды азайтады. Стратегиялық тұрғыда, бұл суық аймақтарда ЖЖС жүйесін енгізу тәуекелдерін төмендетіп, саяси пен инвестициялық шешімдерді ғылыми негіздеуге мүмкіндік береді.

Қорғауға ұсынылған ғылыми тұжырымдар:

1. Төрт жылуалмасу беті арасындағы жүйелік байланыстарды ескеретін жер жылу сорғылары (ЖЖС) үшін шекті уақыт термодинамикасына (ФТТ) негізделген оңтайландыру әдістемесі әзірленді.
2. Жүктелген жылу алмасу жағдайларында (берілген жылу алу және жылу өндіру қарқындары) жұмыс істейтін термодинамикалық модельдер құрылды.
3. Қайтымсыздық әсерін ескере отырып, жылуалмастырғыш тиімділігі мен жылу сыйымдылықтарының оңтайлы бөліну критерийлері анықталды.
4. Алматыдағы тәжірибелік ЖЖС қондырғысы негізінде расталған жылулық тиімділік пен экологиялық көрсеткіштерді біріктіретін ЗЕ (энергия-эксергия-экология) талдау әдістемесі ұсынылды.

Ғылыми тұжырымдар, қорытындылар және нәтижелердің сенімділігі мен дәлдігі.

Бұл диссертацияның сенімділігі термодинамиканың негізгі заңдарына сүйенген қатаң теориялық модельдеуге негізделген. Барлық ЖЖС модельдері масса, энергия және эксергия балансы арқылы бірінші және екінші заңдарға сай құрылған. Шекті уақыт термодинамикасы (ФТТ) жылу алмасу қарқындарының шекті болуын, қайтымсыздықтарды және энтропия түзілуін нақты сипаттайды. Мұндай тәсіл оңтайландыру критерийлерінің (берілген жылу алу және өндіру) және жылуалмастырғыш тиімділігі мен жылу сыйымдылықтарын бөлу ережелерінің ішкі үйлесімділігі мен теориялық негізділігін қамтамасыз етеді. Экологиялық бағалау халықаралық мойындалған ЗЕ әдістемесіне (TEWI көрсеткіші) сәйкес жүргізіліп, бұл термодинамикалық тиімділік пен экологиялық әсер арасындағы байланысын ашық көрсетеді.

Нәтижелердің дұрыстығы көпдеңгейлі сыртқы тексерулер арқылы дәлелденді. Модель болжамдары Алматыдағы тәжірибелік ЖЖС қондырғысындағы нақты өлшеу деректерімен (COP, жер температурасының өзгерісі) салыстырылып, жақсы сәйкестік көрсетті. Сонымен қатар, алынған

нәтижелер халықаралық деңгейдегі ЖЖС және каскадты жылу сорғылары бойынша зерттеулермен үйлеседі. Зерттеу нәтижелері рецензияланған ғылыми журналдарда жарияланып, конференцияларда баяндала отырып, ғылыми сенімділігін арттырады (мысалы, Yerdesh et al., 2020; 2022). Осылайша, теориялық модельдеудің, құрлықтық климат жағдайындағы тәжірибелік растаудың және әдебиеттегі үрдістермен үйлесімділіктің өзара байланысы зерттеу тұжырымдарының беріктігін және ЖЖС жүйелерін жобалау мен оңтайландырудағы практикалық қолданбалы маңызын дәлелдейді.

Диссертацияның басқа ғылыми жобалармен байланысы.

Бұл диссертациялық жұмыс келесі ғылыми-зерттеу жобалары аясында орындалды:

1. AP26102323 – « Жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау және қалдық жылуды пайдалану үшін жоғары температуралы жылу сорғыларының тиімділігі мен конфигурациясын оңтайландыру», ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің гранттық қаржыландыруы, 2025-2027 жж.
2. AP14871988 – « Жылу сорғысы негізінде күн-жылу тұщыландыру қондырғысын әзірлеу», ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің гранттық қаржыландыруы, 2022-2024 жж.
3. AP08857319 – « Жылу сорғыларының жоғары өнімділігін қамтамасыз ету үшін тік ұңғымалы топырақтағы жылу алмастырғыштың жылу алмасу қасиеттерін жақсарту жолдарын зерттеу», ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің гранттық қаржыландыруы, 2020-2022 жж.
4. APP-SSG-17/0280F – «Континенталды климат жағдайында кеңістікті жылыту және ыстық су дайындауға арналған каскадты күн жылу сорғысы», ҚР Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті мен Дүниежүзілік банк қолдаған «Өнімді инновацияларды ынталандыру» бағдарламасы қаржыландыруы, 2018-2020 жж.
5. AP05132668 – « Континенталды климат жағдайында тұрғын үйлерді жоғарыпотенциалды жылумен қамтамасыз етуге арналған автокаскадты күн жылу насосын жасау», ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің гранттық қаржыландыруы, 2018-2020 жж.

Жарияланымдар. Диссертация тақырыбы бойынша автордың 7 ғылыми мақаласы жарық көрді, оның ішінде **4 мақала Scopus және Web of Science деректер базасында индекстелген халықаралық ғылыми журналдарында:**

1. Yerdesh Ye., et al. Numerical simulation on solar collector and cascade heat pump combi water heating systems in Kazakhstan climates, Renewable Energy, Volume 145, 2020, pp. 1222-1234, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.102> (Q1, IF 8.001, Percentile 88, SJR 1.825) (**Бірінші автор**).
2. Yerdesh Ye., et al. Experimental and theoretical investigations of a ground source heat pump system for water and space heating applications in

Kazakhstan, MDPI Energies, Volume 15, №22, 2022, pp. 1-25, <https://doi.org/10.3390/en15228336> (Q3, IF 3.2, Percentile 83, SJR 0.632) (**Бірінші автор**).

3. Karlina Ye., Yerdesh Ye., et al. Numerical simulation study of thermal performance in hot water storage tanks with external and internal heat exchangers, MDPI Energies, Volume 17, №22, 2024, pp.1-18, <https://doi.org/10.3390/en17225623> (Q3, IF 3.2, Percentile 85, SJR 0.713) (**Корреспондент автор**).
4. Baimbetov D., Yerdesh Ye., et al. Thermal analysis of a compression heat pump-assisted solar still for Caspian regions of Kazakhstan, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Volume 149, №19, 2024, pp. 11269-11291, <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13446-4> (Q2, IF 3.1, Percentile 85, SJR 0.551) (**Бірлескен автор**).

2 жарияланым Scopus деректер базасында индекстелген халықаралық конференция материалдарында:

5. Toleukhanov A., Belyayev Ye., Yerdesh Ye., et al. Simulation-based mathematical modeling of borehole heat exchanger thermal performance for ground source heat pumps, Journal of Mathematical Sciences, Conference Paper, Vol. 291, №2, 2025, pp. 323-335, <https://doi.org/10.1007/s10958-025-07811-3> (Percentile 10, SJR 0.153)
6. Belyayev Ye., Toleukhanov A., Yerdesh Ye., et al. Energy and exergy performance study of ground source heat pump in continental climate conditions, AIP Conference Proceedings, Volume 3126, №1, 2024, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1063/5.0200363> (Percentile 10, SJR 0.153)

1 мақала халықаралық ғылыми журналда жарияланды:

7. Yerdesh Ye., et al. Air-to-water cascade heat pump thermal performance modelling for continental climate regions, Entropie Thermodynamique, Volume 3, №1, 2022, pp. 1-16, <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2022.0836> (**Бірінші автор**).

Автордың жеке үлесі.

Автор зерттеу мақсаттары мен міндеттерін айқындап, әдебиеттерге шолу жүргізді және FTT негізінде жер жылу сорғысы жүйелерінің математикалық модельдерін әзірледі. Сондай-ақ, автор 3Е (энергия-эксергия-экология) әдістемесін қолданып, сандық модельдеу мен оңтайландыруды орындап, алынған нәтижелерді талдау арқылы жылуалмастырғыш ресурстарын бөлу, хладагент таңдау және жұмыс температурасын анықтау бойынша жаңа оңтайландыру критерийлері мен жобалау нұсқауларын ұсынды.

Автор тәжірибелік зерттеуге де белсенді қатысты: сынақ қондырғысын дайындап, жылулық және электрлік деректер жинады және модельдерді Қазақстанның құрлықтық климат жағдайында (Алматы қаласындағы қондырғыда) растады. Диссертацияның негізгі мәтіні, талдауы және нәтижелерді түсіндіруі автордың жеке еңбегі болып табылады; ал ғылыми

жетекшілер мен әріптестер әдістемелік және ғылыми тұрғыдан қолдау көрсетті. Бірлескен еңбектердің нәтижелері барлық авторлардың ортақ меншігі болып табылады, ал сыртқы материалдар тиісті бөлімдерде дәйектеліп көрсетілген.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертацияның құрылымы титулдық парағы, мазмұны, кіріспе, екі негізгі тарау, қорытынды және пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыстың жалпы көлемі 81 бет, оның ішінде 29 сурет және 6 кесте қамтылған.

Диссертацияның негізгі мазмұны.

Кіріспе бөлімде зерттеу тақырыбының өзектілігі негізделіп, жұмыстың мақсаты мен міндеттері тұжырымдалған, ғылыми жаңалығы мен зерттеу нәтижелерінің теориялық және практикалық маңыздылығы айқындалған. Сонымен қатар, негізгі нәтижелердің халықаралық конференцияларда талқыланғаны және рецензияланған ғылыми журналдарда жарияланғаны атап өтілген. Кіріспеде жұмыстың құрылымы мен мазмұны қысқаша сипатталған.

Негізгі бөлім екі тараудан және он бөлімнен тұрады.

1-тарауда жер жылу сорғыларының (ЖЖС) жүйелерін оңтайландыруға арналған шекті уақыт термодинамикасы (ФТТ) тұғырнамасы әзірленген. Мұнда ЖЖС технологиялары мен ФТТ әдістеріне шолу жасалып, эндоқайтымды және қайтымсыз циклдердің математикалық модельдері құрастырылған және екі түрлі оңтайландыру критерийі қарастырылған. Нәтижесінде жылуалмастырғыш тиімділігі мен жылу сыйымдылықтарын бөлуге арналған жаңа тәуелділіктер алынған, сондай-ақ циклдің қайтымсыздықтары мен температуралық айырмашылықтың жүйе өнімділігіне әсері айқындалған. Бұл нәтижелер ЖЖС жүйелерін жобалау үшін теориялық негіз қалыптастырған.

2-тарауда Алматы қаласындағы тәжірибелік қондырғы деректері негізінде жер жылу сорғыларына 3Е (энергия-эксергия-экология) талдауы жүргізілген. Онда тәжірибелік қондырғы сипатталып, өлшенген деректермен салыстыра отырып, ЖЖС модельдері әзірленіп, тексерілген. Әр түрлі жұмыс режимдерінде жүйенің өнімділігі, хладагент таңдау, эксергетикалық тиімділік және TEWI (жалпы эквивалентті жылулық әсер) көрсеткіштері талданған. Бұл нәтижелер ұсынылған әдістеменің құрлықтық климат жағдайларына бейімделген практикалық тиімділігін дәлелдейді.

Қорытындыда зерттеудің негізгі нәтижелері жинақталып, олардың ғылыми және қолданбалы маңызы тұжырымдалған, сондай-ақ ЖЖС жүйелерін жобалау мен пайдалану бойынша ұсынымдар берілген. Диссертация соңында пайдаланылған әдебиеттер тізімі келтірілген.