8D06103 – Компьютерлік ғылымдар» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесіне іздену үшін ұсынылған Кенжебек Ержан Ғалымжанұлының «Мұнай ығыстыру есебін модельдеу үшін физикаға негізделген машиналық оқыту» тақырыбындағы диссертациялық жұмысына ресми

РЕЦЕНЗЕНТТІҢ ЖАЗБАША ПІКІРІ

р/н №	Өлшемшарттар	Өлшемшарттарға сәйкестігі (жауап нұсқаларының бірін сызу)	Ресми рецензенттің ұстанымына негіздеме (ескертуді курсивпен көрсету)
1.	Диссертация тақырыбының (бекіту күніне) ғылымның даму бағыттарына және/немесе мемлекеттік бағдарламаларға сәйкес болуы	1.1 Ғылымды дамытудың басым бағыттарына және/немесе мемлекеттік бағдарламаларға сәйкестігі: диссертация мемлекет бюджетінен қаржыландырылатын жобаның немесе нысаналы бағдарламаның аясында орындалған (жобаның немесе бағдарламаның атауы мен нөмірін көрсету); 2) диссертация басқа мемлекеттік бағдарлама аясында орындалған (бағдарламаның атауын көрсету); 3) диссертация Қазақстан Республикасының Үкіметі жанындағы Жоғары ғылыми-техникалық комиссия бекіткен ғылым дамуының басым бағытына сәйкес (бағытын көрсету) келеді.	Ғылымды дамытудың басым бағыттарына сәйкес. Диссертация мемлекет бюджетінен қаржыландырылатын келесі жобалардың аясында орындалған: «Мұнай өндіруді болжау мәселесін шешу үшін машиналық оқыту әдістерін қолдану» - мемлекеттік тіркеу № 0124РК00223, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «Жас Ғалым» жобасы бойынша, 2024-2026 жылдарға арналған; «Мұнайды ығыстыру мәселелерін шешуге арналған параллель физикалық-ақпараттандырылған нейрондық желілер» - мемлекеттік тіркеу № 0124РК00389, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ гранттық қаржыландыру бойынша, 2024-2026 жылдарға арналған. Диссертация Қазақстан Республикасының Үкіметі жанындағы Жоғары ғылыми-техникалық комиссия бекіткен ғылым дамуының – «Озық өндіріс,

			цифрлық және ғарыштық технологиялар» басым бағытына сәйкес келеді.
2.	Ғылым үшін маңыздылығы	Жұмыс ғылымға елеулі үлесін қосады/қоспайды, ал оның маңыздылығы ашылған/ашылмаған.	Жұмыс ғылымға елеулі үлесін қосады, ал оның маңыздылығы ашылған. Диссертациялық зерттеу заманауи ғылымдағы аса өзекті бағыт – физикаға негізделген машиналық оқыту әдістерін мұнай-газ саласында қолдану мәселесін қарастырады. Кеуекті ортадағы екі фазалы ағындарды дәлірек модельдеу қазіргі кезде тек Қазақстан үшін емес, бүкіл әлемдік ғылыми қауымдастық үшін маңызды. Себебі мұндай модельдер мұнай өндірудің тиімділігін арттыруға, жер асты суларының қозғалысын болжауға, геологиялық көмірқышқыл газын сақтау жобаларын оңтайландыруға мүмкіндік береді. Докторант ұсынған PINN және PIKAN архитектуралары дәстүрлі сандық әдістердің шектеулерін жоя отырып, есептеу шығындарын азайтуға және жоғары дәлдікке қол жеткізуге жол ашады.
3.	Өзі жазу принципі	Өзі жазу деңгейі: жоғары;	Өзі жазу деңгейі жоғары.

		2) орташа; 3) төмен; 4) өзі жазбаған.	Диссертациялық жұмыс автордың өз қолымен орындалғаны айқын байқалады. Жұмыстың құрылымында, зерттеу әдістерін таңдауда және нәтижелерді талқылауда авторлық көзқарас анық көрінеді. Әдебиетке шолу барысында шетелдік және отандық еңбектер кеңінен қамтылып, соларға сүйене отырып, зерттеудің бағыты айқындалған. Сонымен бірге, PINN және PIKAN әдістерін бейімдеу, оларды мұнай ығыстыру есебіне қолдану және нәтижелерін салыстырмалы талдау – бұл жұмыстың докторанттың жеке ізденісі мен ғылыми ойлау қабілетінің айқын көрінісі болып табылады. Диссертацияның негізгі нәтижелері халықаралық конференцияларда және жоғары импакт-факторлы журналдарда жарияланып, ғылыми қауымдастық тарапынан мойындалған.
4.	Ішкі бірлік принципі	4.1 Диссертация өзектілігінің негіздемесі: негізделген; 2) ішінара негізделген; 3) негізделмеген.	Диссертация өзектілігі негізделген. Зерттеу өзектілігі қазіргі ғылым мен өндірістің талаптарына толық сәйкес келеді. Мұнай өндіру, жер асты суларының қозғалысы мен көмірқышқыл газын сақтау сияқты стратегиялық маңызды салаларда көпфазалы ағынды дәлірек

			модельдеу міндеті өзекті болып саналады.
		4.2 Диссертация мазмұны диссертация тақырыбын айқындайды:	Диссертация мазмұны диссертация тақырыбын айқындайды. Әр тарау тақырыпты ашуға бағытталған: бірінші тарауда ғылыми негіздер мен әдеби шолу, екінші тарауда PINN әдісінің қолданылуы, үшінші тарауда PIKAN тәсілінің артықшылықтары мен салыстырмалы талдауы берілген.
		айқындайды;	
		2) ішінара айқындайды;	
		3) айқындамайды.	
		4.3. Мақсаты мен міндеттері диссертация тақырыбына сәйкес келеді:	Диссертациялық жұмыстың мақсаты мен міндеттері диссертация тақырыбына толық сәйкес келеді. Ізденуші нақты мақсатқа жету үшін ғылыми шолу, математикалық модельдеу, сандық эксперименттер, әдістерді салыстыру және нәтижелерді валидациялау сияқты міндеттерді орындаған.
		сәйкес келеді;	
		2) ішінара сәйкес келеді;	
		3) сәйкес келмейді.	
		Диссертацияның барлық бөлімдері мен ережелері логикалық байланысқан:	Диссертацияның барлық бөлімдері мен ережелері логикалық толық байланысқан. Кіріспеден бастап қорытындыға дейін диссертация логикалық жүйеде құрылған. Әр тарау алдыңғы бөлімнің жалғасы іспеттес және нәтижелер бір-бірін толықтырады. Жаңа әдістердің енгізілуі мен салыстырмалы талдауы логикалық дәйектілікті көрсетеді.
		толық байланысқан;	
		2) ішінара байланысқан;	
		3) байланыс жоқ.	

		4.5 Автор ұсынған жаңа шешімдер (қағидаттар, әдістер) дәлелденіп, бұрыннан белгілі шешімдермен салыстырылып бағаланған:	Диссертацияда автор ұсынған жаңа шешімдер (қағидаттар, әдістер) дәлелденіп, бұрыннан белгілі шешімдермен салыстырылып бағаланған және олардың сыни талдауы бар. PINN және PIKAN әдістерін бейімдеу барысында олар өзара және әдебиеттерде кездесетін тәсілдермен салыстырылып, артықшылықтары сандық дәлелдер арқылы көрсетілген. Орташа салыстырмалы қателіктің қысқаруы және параметрлер санының азаюы ұсынылған шешімдердің тиімділігін айқын көрсетеді.
		сыни талдау бар;	
		2) талдау ішінара жүргізілген;	
		3) талдау өз пікіріне емес, басқа авторлардың сілтемелеріне негізделген;	
		4) талдау жоқ.	
5.	Ғылыми жаңашылдық принципі	5.1 Ғылыми нәтижелер мен ережелер жаңа ма?	Ғылыми нәтижелер мен ережелер толығымен жаңа. Зерттеу барысында ұсынылған тәсілдер толықтай жаңа болып табылады. PINN және PIKAN нейрондық желілерін біртұтас архитектурада қолдану арқылы қысым мен қанықтылықты бір мезгілде модельдеу ғылыми тұрғыдан тың бағыт болып саналады.
		толығымен жаңа;	
		2) ішінара жаңа (25-75% жаңа);	
		3) жаңа емес (жаңасы 25%-дан кем).	
		5.2 Диссертацияның қорытындылары жаңа ма?	Диссертацияның қорытындылары толығымен жаңа. Қорытындылар диссертацияда алынған нәтижелерге сүйене отырып жасалған және олардың жаңалығы сандық талдау арқылы дәлелденген. Жасанды диффузия мен шығын функциясын
		толығымен жаңа;	
		2) ішінара жаңа (25-75% жаңа);	
		3) жаңа емес (жаңасы 25%-дан кем).	

			салмақтау стратегиясын біріктіру нәтижесінде қанықтылықтағы қателік 27,86%-ға, қысымдағы қателік 44,4%-ға азайған. Бұл көрсеткіштер жұмыстың қорытындыларының бірегейлігін айғақтайды.
		5.3 Техникалық, технологиялық, экономикалық немесе басқару шешімдері жаңа және негізделген бе?	Техникалық, технологиялық, экономикалық немесе басқару шешімдері толығымен жаңа. Жұмыста ұсынылған шешімдер тек ғылыми теорияда ғана емес, практикада да жаңа мүмкіндіктер береді. PIKAN архитектурасының параметрлер санын 15 есеге дейін қысқартуы мұнай-газ саласындағы есептеу шығындарын азайтуға және модельдеудің тиімділігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.
		толығымен жаңа;	
		2) ішінара жаңа (25-75% жаңа);	
		3) жаңа емес (жаңасы 25%-дан кем).	
6.	Негізгі қорытындылардың негізділігі	Барлық негізгі қорытындылар ғылыми тұрғыдан қарағанда ауқымды дәлелдемелерде негізделген/негізделмеген (qualitative research (куолитатив ресеч) және өнер және гуманитарлық ғылымдар бойынша даярлық бағыттары үшін).	Диссертацияның барлық негізгі қорытындылары ғылыми тұрғыдан ауқымды дәлелдемелерде негізделген. Зерттеу қорытындылары нақты математикалық модельдерге, сандық эксперименттерге және статистикалық бағалауларға сүйеніп жасалған. Барлық негізгі тұжырымдар эталондық шешімдермен салыстыру, дәстүрлі әдістер арқылы валидациялау және аналитикалық талдау нәтижелерімен

			расталған. Қысым мен қанықтылықты бір мезетте модельдеу тәсілдерінің сенімділігі нәтижелерімен, PINN және PIKAN әдістерін жүйелі салыстырумен және олардың тиімділігін талдаумен дәлелденген.
7.	Қорғауға шығарылған негізгі ережелер	Әрбір ереже бойынша келесі сұрақтарға жеке жауап беру қажет: 7.1 Ереже дәлелденді ме? дәлелденді; 2) шамамен дәлелденді; 3) шамамен дәлелденбеді; 4) дәлелденбеді; 5) бұл тұжырымда ереженің дәлелденгенін тексеру мүмкін емес. 7.2 Тривиалды ма? 1) ия; жоқ; 3) бұл тұжырымда ереженің тривиалды екенін тексеру мүмкін емес. 7.3 Жаңа ма? ия; 2) жоқ; 3) бұл тұжырымда ереженің жаңашылдығын тексеру мүмкін емес. 7.4 Қолдану деңгейі: тар; орташа; 3) кең	Қорғауға екі негізгі тұжырымдама ұсынылған: Тұжырым 1 PINN әдісінде жасанды диффузияны шығын функциясын оңтайлы салмақтау стратегиясымен үйлестіру екі фазалы фильтрация процестерін модельдеудің дәлдігін арттыруға ықпал етеді. 7.1 Дәлелденді ме? Иә, дәлелденді. Жүргізілген сандық эксперименттердің (650-ден астам) нәтижелері қанықтылық бойынша орташа салыстырмалы қателіктің 27,86%-ға, қысым бойынша 44,4%-ға төмендегенін көрсетті. 7.2 Тривиалды ма? Жоқ, тривиалды емес. Бұған дейін стандартты PINN тәсілдері гиперболалық фронттарды аппроксимациялау кезінде қосымша модификациясыз қажетті дәлдікке жете алмаған.

		4) бұл тұжырымда ереженің қолдану деңгейін тексеру мүмкін емес. 7.5 Мақалада дәлелденген бе? ия; 2) жоқ 3) бұл тұжырымда мақаладағы ереженің дәлелденгенін тексеру мүмкін емес.	7.3 Жаңашылдығы бар ма? Иә, бар. Жасанды диффузияны шығын функциясын теңгерімді салмақтау әдісімен ұштастыру арқылы жаңа тәсіл ұсынылып, оның тиімділігі негізделген. 7.4 Қолдану деңгейі қандай? Тар. Әдіс ғылыми зерттеулерде және инженерлік есептеулерде қолдануға жарамды, алайда оны жүзеге асыру үшін нейрондық желілер мен сандық модельдеу саласында кәсіби дайындықты талап етеді. 7.5 Мақалада дәлелденген бе? Иә. Бұл тұжырым диссертация авторының жарияланған еңбектерінде сандық салыстырулармен және модельдердің нәтижелерімен бекітілген. Тұжырым 2 PIKAN архитектурасы параметрлер санын айтарлықтай қысқарта отырып (шамамен 15 есеге), PINN әдісімен салыстырмалы дәлдікке қол жеткізуді қамтамасыз етеді. 7.1 Дәлелденді ме? Иә, дәлелденді. Салыстырмалы талдау барысында PIKAN 1 722 параметрді қолдана отырып, 25 752 параметрі бар PINN моделіне тең деңгейдегі дәлдік көрсеткен.

			7.2 Тривиалды ма? Жоқ, тривиалды емес. Себебі ықшам архитектуралардың мұндай есептерде жеткілікті дәлдік беруі бұрын ғылыми тәжірибеде көрсетілмеген. 7.3 Жаңашылдығы бар ма? Иә, бар. Бұл жұмыста алғаш рет PIKAN архитектурасы Бакли–Леверетт моделі негізіндегі мұнай ығыстыру есебіне бейімделіп, оның артықшылықтары дәлелденді. 7.4 Қолдану деңгейі қандай? Орташа. Әдістеме ғылыми зерттеулер мен инженерлік тәжірибеде қолдануға қолайлы, бірақ оны тиімді пайдалану үшін машиналық оқыту және есептеу математикасы саласында терең дайындық қажет. 7.5 Мақалада дәлелденген бе? Иә. Бұл қорытындылар халықаралық басылымдарда жарияланған мақалаларда сандық салыстырулармен және нақты қателік көрсеткіштерімен расталған.
8.	Дәйектілік қағидаты.	8.1 Әдіснаманы таңдау – негізделген немесе әдіснама нақты жазылған:	Әдіснаманы таңдау алынған нәтижелермен негізделген. Зерттеуде қолданылған әдістемелік тәсілдер зерттеу міндеттерімен тікелей байланысты. Физикамен ақпараттандырылған нейрондық желілерді (PINN және PIKAN)
	Дереккөздер мен ұсынылған ақпараттың дәйектілігі	ия;	
		2) жоқ.	

			таңдау көпфазалы ағынды модельдеудің күрделі мәселелерін шешуге мүмкіндік берді. Әдістердің дұрыстығы сандық эксперименттер мен аналитикалық салыстырулар арқылы расталған.
		8.2 Диссертация жұмысының нәтижелері компьютерлік технологияларды қолдану арқылы ғылыми зерттеулердің қазіргі заманғы әдістері мен деректерді өңдеу және интерпретациялау әдістемелерін пайдалана отырып алынған:	Диссертация жұмысының нәтижелері компьютерлік технологияларды қолдану арқылы ғылыми зерттеулердің қазіргі заманғы әдістері мен деректерді өңдеу және интерпретациялау әдістемелерін пайдалана отырып алынған. Нәтижелер заманауи машиналық оқыту алгоритмдерін (ADAM, L-BFGS), GPU есептеулерін және коллокациялық нүктелерді қолдану арқылы алынған. Бұл ғылыми зерттеулердің қазіргі кезеңдегі жоғары талаптарына толық сәйкес келеді.
		ия;	
		2) жоқ.	
		8.3 Теориялық қорытындылар, модельдер, анықталған өзара байланыстар және заңдылықтар эксперименттік зерттеулермен дәлелденген және расталған (педагогикалық ғылымдар бойынша даярлау бағыттары үшін нәтижелер педагогикалық эксперимент негізінде дәлелденеді):	Теориялық қорытындылар, модельдер, анықталған өзара байланыстар және заңдылықтар эксперименттік зерттеулермен дәлелденген және расталған. Теориялық тұрғыда алынған модельдер мен тұжырымдар сандық эксперименттер арқылы тексерілген. PINN және PIKAN әдістерінің нәтижелері аналитикалық шешімдермен және дәстүрлі сандық
		ия;	
		2) жоқ.	

			әдістермен салыстырылып, олардың дұрыстығы дәлелденген.
		8.4 Маңызды мәлімдемелер нақты және сенімді ғылыми әдебиеттерге сілтемелермен расталған / ішінара расталған / расталмаған.	Маңызды мәлімдемелер нақты және сенімді ғылыми әдебиеттерге сілтемелермен расталған. Диссертацияда жасалған негізгі тұжырымдар халықаралық деңгейде мойындалған ғылыми еңбектерге сүйеніп жазылған. Әдебиеттер тізіміне соңғы жылдардағы беделді журналдардағы мақалалар енгізілген, бұл зерттеу нәтижелерінің дәйектілігін күшейтеді.
		8.5 Пайдаланылған әдебиеттер тізімі әдеби шолуға жеткілікті/жеткіліксіз.	Пайдаланылған әдебиеттер тізімі әдеби шолуға жеткілікті. Әдебиеттер тізімінде 100-ден астам дереккөз қамтылған. Олардың ішінде халықаралық индекстелген журналдардағы мақалалар, конференция материалдары және отандық ғылыми еңбектер бар. Бұл әдебиет шолуында мәселенің толық әрі жан-жақты қарастырылғанын дәлелдейді.
9.	Практикалық құндылық қағидаты	9.1 Диссертацияның теориялық маңызы:	Диссертацияның теориялық маңызы бар. Зерттеу нәтижелері физикаға негізделген машиналық оқыту әдістерінің теориялық негізін кеңейтеді. Колмогоров–Арнольд желілерін көпфазалы ағын есептеріне бейімдеу арқылы
		бар;	
		2) жоқ.	

			математикалық модельдеудің жаңа мүмкіндіктері айқындалған.
		9.2 Диссертацияның практикалық маңызы бар және алынған нәтижелерді практикада қолдану мүмкіндігі жоғары:	Диссертацияның практикалық маңызы бар және алынған нәтижелерді практикада қолдану мүмкіндігі жоғары. Ұсынылған әдістерді мұнай өндіруді болжау және оңтайландыру процестеріне енгізуге болады, бұл олардың нақты өндірістік жағдайларда қолданылу ықтималдығын арттырады.
		ия;	
		2) жоқ.	
		Практикалық ұсыныстар жаңа ма?	Практикалық ұсыныстар толығымен жаңа. PIKAN архитектурасын қолдану арқылы параметрлер санын айтарлықтай қысқарту және қанықтылық пен қысымды біртұтас модельдеу тәсілі мұнай-газ инженериясы үшін жаңа практикалық құрал ретінде бағаланады.
		толығымен жаңа;	
		2) ішінара жаңа (25-75% жаңа);	
		3) жаңа емес (жаңасы 25%-дан кем).	
10.	Жазу және ресімдеу сапасы	Академиялық жазу сапасы:	Академиялық жазу сапасы жоғары. Диссертация академиялық талаптарға сай жазылған. Тақырыптың мазмұны мен құрылымы жүйелі түрде баяндалып, мәтіннің ғылыми стилі сақталған. Кестелер мен суреттер түсінікті рәсімделген. Әдебиеттер тізімі халықаралық стандарттарға сәйкес рәсімделген. Құжаттың жалпы тілі түсінікті әрі ресми-ғылыми сипатта рәсімделген.
		жоғары;	
		2) орташа;	
		3) орташадан төмен;	
		4) төмен.	

11.	Диссертацияға ескертулер		Диссертация PINN/PIKAN-да қысым мен қанықтылықты бір желіде оқытуды мақсат етеді. Бұл диссертация логикасының өзегі. Оны кіріспедегі мақсат-міндеттермен қоса, тарау-аралық байланыста айқынырақ көрсетіп, дәстүрлі IMPES-ке (қысымды имплицитті, қанықтылықты эксплицитті есептеу әдісіне) қарағанда (айнымалыларды бөлек жүргізетін) артықшылықты қысқа абзацпен қорытынды қосуға болады. Құрылымда бұған ой бар, бірақ нақтылап айтуды қажет етеді. және L-BFGS оқу циклі, тоқтату критерийлері, GPU, random seed бекітілуін көрсетілуі өте дұрыс. Сонымен қатар, коллокациялық нүктелер саны/тор тығыздығы, BC/IC үлгінің бөлінуі, batch/epoch саясаты, уақыт-кеңістік дискретизациясы (t/x grid) және деректер генерациясы (аналитикалық/сандық эталон) туралы нақты кестемен диссертацияның қорытындыларын толықтыруға болады.

12.	Докторант мақалаларының зерттеу тақырыбы бойынша ғылыми деңгейі (диссертация мақалалар сериясы нысанында қорғалған жағдайда ресми рецензенттер докторанттың зерттеу тақырыбы бойынша әр мақаласының ғылыми деңгейін зерделейді)		Докторанттың жарияланған мақалаларының зерттеу тақырыбы бойынша ғылыми деңгейі жоғары. ҚР ҒЖБМ Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған журналдарда, Web of Science және Scopus базасына енген рецензияланатын халықаралық журналдарда жарық көрген мақалалар бар. Сонымен қатар, халықаралық конференцияларда баяндамалар жасалып, нәтижелер ғылыми қауымдастық тарапынан оң бағаланған.
13.	Ресми рецензенттің шешімі (осы Үлгі ереженің 28-тармағына сәйкес)		Компьютерлік ғылымдар» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға лайық деп санаймын.

Ресми рецензент:

қауымдастырыллған профессор,
Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің
«Жасанды интеллект» ғылыми-зерттеу институтының
директоры _____ **Барлыбаев Әлібек Бақтыбайұлы**

Қолын куәландырамын
Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ
ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
КАДР ҚЫЗМЕТІ
«___» _____ 20___ г.