«8D06102 – Компьютерлік инженерия» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесіне іздену үшін ұсынылған Мустафин Максат Бейбитовичтің «Диффузия теңдеуін физикаға негізделген нейрондық желілерді қолданып шешу арқылы бейімделген құрылымдалған тор құру» тақырыбындағы диссертациялық жұмысына ресми

РЕЦЕНЗЕНТТІҢ ЖАЗБАША ПІКІРІ

р/н №	Өлшемшарттар	Өлшемшарттарға сәйкестігі (жауап нұсқаларының бірін сызу)	Ресми рецензенттің ұстанымына негіздеме (ескертуді курсивпен көрсету)
	Диссертация тақырыбының (бекіту күніне) ғылымның даму бағыттарына және/немесе мемлекеттік бағдарламаларға сәйкес болуы	1.1 Ғылымды дамытудың басым бағыттарына және/немесе мемлекеттік бағдарламаларға сәйкестігі: 1) 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 жоба аясында орындалған: «Құрылымдалмаған адаптивті торларды жоғары өнімді құру және визуализациялау» - мемлекеттік тіркеу № 0124РК00207, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «Жас Ғалым» жобасы бойынша, 2024-2026 жылдарға арналған. Тақырып қазіргі уақытта Қазақстан Республикасында сандық модельдеу, жасанды интеллект және есептеуіш математика бағыттарының басым дамуына толық сәйкес келеді. Жұмыс 8D06102 – «Компьютерлік инженерия» мамандығы аясында орындалған және елдің «Цифрлық Қазақстан» бағдарламасының ғылыми бағыттарымен үйлеседі.
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 жұмыс ғылыми тұрғыдан өзекті, себебі бейімделген есептік торларды құруда диффузия теңдеуі мен физикаға негізделген нейрожелілерді (PINN) біріктіру жаңа бағыт болып табылады. Алынған нәтижелер есептеу математикасы мен инженерлік модельдеу саласына маңызды үлес қосады.
3.	Өзі жазу принципі	Өзі жазу деңгейі:	Өзі жазу деңгейі жоғары.

		1) жоғары; 2) орташа; 3) төмен; 4) өзі жазбаған.	Диссертация жоғары деңгейде дербес орындалған. Автор әдістемені өз бетінше құрастырып, классикалық және модификацияланған PINN (MPINN) архитектураларын жасап, есептік эксперименттерді жүргізген.
4.	Ішкі бірлік принципі	4.1 Диссертация өзектілігінің негіздемесі: 1) негізделген; 2) ішінара негізделген; 3) негізделмеген.	Диссертация өзектілігі негізделген. Зерттеу өзектілігі толық дәлелденген, себебі тор генерациясы есептеу дәлдігі мен ресурсты үнемдеу үшін негізгі міндеттердің бірі болып табылады.
		4.2 Диссертация мазмұны диссертация тақырыбын айқындайды: 1) айқындайды; 2) ішінара айқындайды; 3) айқындамайды.	Диссертация мазмұны диссертация тақырыбын айқындайды. Диссертация қойылған тақырыпты толық қамтиды, бөлімдердің логикалық байланысы сақталған.
		4.3. Мақсаты мен міндеттері диссертация тақырыбына сәйкес келеді: 1) сәйкес келеді; 2) ішінара сәйкес келеді; 3) сәйкес келмейді.	Диссертациялық жұмыстың мақсаты мен міндеттері диссертация тақырыбына толық сәйкес келеді. Ізденуші қойылған мақсатты жүзеге асыру барысында ғылыми әдебиеттерді жүйелі талдау, математикалық модельді құру және негіздеу, сандық эксперименттер жүргізу, қолданылған әдістердің тиімділігін өзара салыстыру, сондай-ақ алынған нәтижелердің дұрыстығын тексеру сияқты барлық қажетті ғылыми міндеттерді толық көлемде орындаған.
		4.4. Диссертацияның барлық бөлімдері мен ережелері логикалық байланысқан: 1) толық байланысқан; 2) ішінара байланысқан; 3) байланыс жоқ.	Диссертацияның барлық бөлімдері мен ережелері логикалық толық байланысқан. Баяндау жүйелі және ғылыми тұжырымдар логикалық ретпен берілген.
		4.5 Автор ұсынған жаңа шешімдер (қағидаттар, әдістер) дәлелденіп, бұрыннан белгілі шешімдермен салыстырылып бағаланған: 1) сыни талдау бар;	Диссертацияда автор ұсынған жаңа шешімдер (қағидаттар, әдістер) дәлелденіп, бұрыннан белгілі шешімдермен салыстырылып бағаланған және олардың сыни талдауы бар. Жаңа шешімдер – MPINN архитектурасын енгізу және ADF-маска функциясын

		2) талдау ішінара жүргізілген;	қолдану – теориялық тұрғыдан негізделіп, тәжірибелік нәтижелермен дәлелденген.
		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 диффузия теңдеуін PINN арқылы шешу және бейімделген тор генерациясын осы тәсілмен іске асыру алғаш рет көрсетілген.
		1) 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 және алынған нәтижелерге негізделген, олардың ғылыми жаңалығы нақты көрсетілген.
		1) толығымен жаңа;	
		2) ішінара жаңа (25-75% жаңа);	
		3) жаңа емес (жаңасы 25%-дан кем).	
		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. MPINN архитектурасы мен ADF функциясын қолдану – жаңа әрі негізделген инженерлік шешімдер.
		1) 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 сандық және аналитикалық эксперименттермен дәлелденген, қателік шамалары RMSE және MaxDifference арқылы бағаланған.
7.	Қорғауға шығарылған негізгі ережелер	Әрбір ереже бойынша келесі сұрақтарға жеке жауап беру қажет:	Қорғауға екі негізгі тұжырымдама ұсынылған: Тұжырым 1 Диффузия теңдеуіне негізделген бейімделген бірөлшемді есептік торды PINN әдісімен құру және оның аналитикалық шешіммен жоғары дәлдікпен
		7.1 Ереже дәлелденді ме?	
		1) дәлелденді;	
		2) шамамен дәлелденді;	
		3) шамамен дәлелденбеді;	

		4) дәлелденбеді; 5) бұл тұжырымда ереженің дәлелденгенін тексеру мүмкін емес. 7.2 Тривиалды ма? 1) ия; 2) жоқ; 3) бұл тұжырымда ереженің тривиалды екенін тексеру мүмкін емес. 7.3 Жаңа ма? 1) ия; 2) жоқ; 3) бұл тұжырымда ереженің жаңашылдығын тексеру мүмкін емес. 7.4 Қолдану деңгейі: 1) тар; 2) орташа; 3) кең 4) бұл тұжырымда ереженің қолдану деңгейін тексеру мүмкін емес. 7.5 Мақалада дәлелденген бе? 1) ия; 2) жоқ 3) бұл тұжырымда мақаладағы ереженің дәлелденгенін тексеру мүмкін емес.	сәйкес келуі. 7.1 Дәлелденді ме? Иә, дәлелденді. PINN моделі аналитикалық шешімі белгілі тесттік есепте қолданылып, RMSE шамасы $3 \cdot 10^{-6}$, ал түйіндердің максималды айырмашылығы $5 \cdot 10^{-6}$деңгейінде алынған. Бұл әдістің дәлдігі жоғары екенін сандық дәлелдер толық көрсетеді. 7.2 Тривиалды ма? Жоқ, тривиалды емес. PINN-ді диффузия теңдеуі арқылы бейімделген торға қолдану классикалық әдебиетте кездеспейді, күрделі градиенттік есептеулер мен физикалық қалдықты азайтуға негізделген көпқадамды процедураны талап етеді. 7.3 Жаңашылдығы бар ма? Иә, бар. Диффузия теңдеуі негізінде тор генерациясын PINN арқылы іске асыру бірінші рет ұсынылған. Бұрынғы жұмыстар тор құруда PINN-ді қолданбаған немесе тек PDE шешімдеріне бағытталған. 7.4 Қолдану деңгейі қандай? Кең. Әдіс кез келген біріншемді тор бейімдеу есептеріне, соның ішінде жылуөткізгіштік, газ–динамика, электродинамика сияқты PDE модельдерінде қолданыла алады. 7.5 Мақалада дәлелденген бе? Иә. «Adaptive Grid Generation by Solving Diffusion Equation Using Physics-Informed Neural Networks» атты Scopus мақаласында толық дәлелдері мен сынақ нәтижелері берілген. Тұжырым 2 Шекаралық шарттарды дәл сақтау үшін модификацияланған MPINN архитектурасын (ADF-маска функциясы арқылы) енгізу. 7.1 Дәлелденді ме? Иә, дәлелденді. MPINN архитектурасы енгізілгеннен кейін шекаралық нүктелер үшін $s(0) = 0$ және $s(1) = 1$ мәндері машина

			дәлдігімен (10^{-8} деңгейінде) орындалғаны эксперименттік түрде көрсетілген. 7.2 Тривиалды ма? Жоқ, тривиалды емес. Шекаралық шарттарды қатты енгізетін маска-функция (ADF) — классикалық PINN архитектураларында кездеспейді. Бұл әдіс арнайы геометриялық параметрлендіруді және аналитикалық түрде нөлге жуықтайтын функция құруды талап етеді. 7.3 Жаңашылдығы бар ма? Иә, бар. MPINN архитектурасы және ADF-маска арқылы шекараны ішкі механизм ретінде бекіту — автордың жаңалығы. Бұрынғы жұмыстарда шекаралық шарттар тек шығын функциясы арқылы енгізілген. 7.4 Қолдану деңгейі қандай? Кең. Маска-функция тәсілі 1D ғана емес, 2D және 3D тор генерациясында, сондай-ақ кез келген Дирихле типіндегі шекаралық шарттарды дәл орындауды қажет ететін PDE-жүйелерде қолдануға болады. 7.5 Мақалада дәлелденген бе? Иә. MPINN нәтижелері Scopus мақаласында және диссертацияның 1D/2D эксперименттік бөлімдерінде ғылыми дәлелдермен расталған.
8.	Дәйектілік қағидаты.	8.1 Әдіснаманы таңдау – негізделген немесе әдіснама нақты жазылған:	Әдіснаманы таңдау алынған нәтижелермен негізделген. Таңдалған әдістеме (диффузиялық теңдеу + PINN) ғылыми тұрғыда негізделген және заманауи талаптарға сай.
	Дереккөздер мен ұсынылған ақпараттың дәйектілігі	1) ия;	
		2) жоқ.	
		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. Зерттеу барысында Python, PyTorch кітапханалары, автоматты дифференциалдау және нейрожелілік есептеу технологиялары қолданылған.
		1) 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. Барлық теориялық тұжырымдар сандық модельдеу нәтижелерімен расталған.
		1) ия;	
		2) жоқ.	
		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. Сілтемелер саны жеткілікті, шетелдік (MDPI Algorithms 2025, IEEE, Elsevier) және отандық дереккөздер пайдаланылған.
		8.5 Пайдаланылған әдебиеттер тізімі әдеби шолуға жеткілікті/жеткіліксіз.	Пайдаланылған әдебиеттер тізімі әдеби шолуға жеткілікті. Әдебиеттер тізімі жеткілікті және қазіргі ғылыми деңгейге сәйкес.
9	Практикалық құндылық қағидалары	9.1 Диссертацияның теориялық маңызы:	Диссертацияның теориялық маңызы бар. Зерттеу нәтижесінде PINN мен диффузия теңдеуін біріктірудің жаңа тәсілі ұсынылған.
		1) бар;	
		2) жоқ.	
		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 есептеу математикасы, физикалық модельдеу және инженерлік симуляцияларда қолдануға жарамды.
		1) ия;	
		2) жоқ.	
		9.3 Практикалық ұсыныстар жаңа ма?	Практикалық ұсыныстар толығымен жаңа. Шекаралық шарттарды ADF арқылы енгізу мен бейімделу тұрақтылығын арттыру тәсілдері ұсынылған.
		1) толығымен жаңа;	
		2) ішінара жаңа (25-75% жаңа);	
		3) жаңа емес (жаңасы 25%-дан кем).	

10.	Жазу және ресімдеу сапасы	Академиялық жазу сапасы: 1) жоғары; 2) орташа; 3) орташадан төмен; 4) төмен.	Академиялық жазу сапасы жоғары. Құрылымы мен безендірілуі стандарттарға сай, тілдік және терминологиялық дәлдігі қамтамасыз етілген.
11.	Диссертацияға ескертулер		Ескертулер елеусіз: 1) кейбір суреттерде графиктердің осьтерінің атаулары берілмеген; 2) мысал ретінде стационар емес нақты бір физикалық процесті суреттейтін стационар емес есеп қарастырылғанда жақсы болар еді (мысалы жылу өткізгіштіктің стационар емес есебі).
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)		Автордың жарияланымдары Scopus және Web of Science базаларына енген журналдарда жарияланған; олардың мазмұны диссертация тақырыбымен тікелей байланысты және жоғары ғылыми деңгейде.
13.	Ресми рецензенттің шешімі (осы Үлгі ережеңің 28-тармағына сәйкес)		«8D06102 – Компьютерлік инженерия» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін беруге толық сәйкес келеді, қорғауға ұсынылады деп санаймын.

Ресми рецензент:
т.ғ.к., қауымдастырылған профессор,
Сәрсен Аманжолов атындағы ШҚУ

Малгаждаров Ержан Амангазынович