REPORT

of the scientific advisor for the dissertation thesis submitted by
Yerzhan Kenzhebek for the degree of Doctor of Philosophy (PhD)
in the specialty 8D06103 – Computer Science entitled

"Physics-Informed Machine Learning for Modeling Oil Displacement Problem"

This report is presented to certify that the doctoral student, M. Yerzhan Kenzhebek, has successfully fulfilled all the requirements needed for the Ph.D. degree conferment.

Overview and Objectives of the Study

The dissertation by Yerzhan Kenzhebek presents a new study on using machine learning methods based on physical laws to model oil displacement in porous rocks. The work focuses on improving traditional models that describe how water displaces oil in underground reservoirs, using two neural network approaches: Physics-Informed Neural Networks (PINN) and the Physics-Informed Kolmogorov–Arnold Network (PIKAN). The goal is to develop a model that can predict both saturation and pressure at the same time, which is important for realistic reservoir simulations with limited available data.

The dissertation consists of an introduction, three main chapters, and a conclusion. It presents a detailed study based on numerical modeling using neural networks, without relying on commercial simulators. The work focuses on solving the Buckley–Leverett problem through advanced physics-based machine learning methods and includes a series of structured experiments comparing PINN and PIKAN models. The author published the results in peer-reviewed journals and presented them at international conferences, which confirms the scientific relevance and the practical potential of the proposed methodology for improving the accuracy of reservoir modeling.

Key Achievements

One of the main results of the thesis is the development of the PIKAN model, which needs far fewer parameters than the usual PINN model but still gives accurate results. The author also shows that adding artificial diffusion and adjusting the weights during training improves the precision of predictions. The model's performance was tested in multiple experiments and compared with known analytical solutions, which confirms the reliability of the proposed method.

Observations and Recommendations

The thesis is well structured and clearly written. It shows that the author understands both the physical processes and the logic of machine learning. The results are convincing and supported by presentations at international conferences and scientific publications. Although the models work well, there are still some small limitations, such as minor drops in accuracy in some cases. In the future, the training process could be further improved using automatic tuning methods.

Evaluation of Relevance, Novelty, and Practical Value

This research is highly relevant, as the modeling of multiphase flow plays a crucial role in addressing significant engineering challenges, particularly in the areas of oil recovery and groundwater management. In his dissertation, Yerzhan Kenzhebek proposes methods for solving oil displacement problems using physics-informed machine learning techniques, specifically PINN and PIKAN. The work aims to enhance classical theories of oil–water displacement through numerical modeling and advanced computational approaches.

The scientific novelty of the dissertation lies in the application of these machine learning methods to the classical Buckley–Leverett model. The study effectively addresses the problem of modeling coupled pressure and saturation fields. The author evaluates the performance and adaptability of both approaches and shows that PIKAN allows a strong reduction in model complexity without losing accuracy.

The experimental results confirm the comparative effectiveness of the two methods. The findings show that the PINN approach reduces the mean relative L2 error by 27.86% for saturation prediction and by 44.4% for pressure prediction. Additionally, the PIKAN architecture led to a 15-fold reduction in the number of trainable parameters, which improved the efficiency of the model's setup. These results support the scientific soundness and practical potential of the proposed methods.

Conclusion

Overall, the dissertation is carried out at a high academic level. The methods are well explained, the experiments are solid, and the results are useful for both theory and practice. Yerzhan Kenzhebek's work meets the expected standards for a PhD thesis. It offers a meaningful contribution to current research in the field and can help improve modeling tools for oil reservoir studies. I recommend the dissertation for defense.

Irina PANFILOV
Scientific Advisor for the Dissertation

Professor, ENSG – LEMTA (UMR7563) – University of Lorraine,
Responsible for specialty "Geology Energies & Reservoirs Engineering" of Master STPE,
Tel.: (+33)3 72 74 42 78, irina.panfilova@univ-lorraine.fr

11/07/2025
Vandœuvre-lès-Nancy

Кенжебек Ержанның 8D06103 – Компьютерлік ғылымдар білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін ұсынылған

“Мұнай ығыстыру есебін модельдеу үшін физикаға негізделген машиналық оқыту”

тақырыбындағы диссертациялық жұмысына ғылыми кеңесшінің

ПІКІРІ

Бұл пікір докторант Кенжебек Ержанның PhD дәрежесін алу үшін қажетті барлық талаптарды сәтті орындағанын растау үшін ұсынылады.

Зерттеудің шолуы мен мақсаттары

Кенжебек Ержанның диссертациялық жұмысы физикалық заңдарға негізделген машиналық оқыту әдістерін пайдаланып, кеуекті ортадағы мұнайдың ығысуын модельдеуге арналған жаңа зерттеуді ұсынады. Жұмыс, жерасты қабаттарындағы судың мұнайды қалай ығыстыратынын сипаттайтын дәстүрлі модельдерді жетілдіруге бағытталған. Бұл үшін екі нейрондық желі әдісі қолданылған: физикаға негізделген нейрондық желі (PINN) және физикаға негізделген Колмогоров–Арнольд желісі (PIKAN). Зерттеудің мақсаты – қанықтылықты да, қысымды да бір уақытта болжай алатын модельді әзірлеу, бұл шектеулі қолжетімді деректер жағдайында резервуарды шынайы модельдеу үшін маңызды болып табылады.

Диссертация кіріспеден, үш негізгі тараудан және қорытындыдан тұрады. Ол коммерциялық симуляторларды пайдаланбай, нейрондық желілерді қолдана отырып, сандық модельдеуге негізделген егжей-тегжейлі зерттеуді ұсынады. Жұмыс физикаға негізделген машиналық оқытудың озық әдістері арқылы Бакли-Леверетт мәселесін шешуге бағытталған және PINN мен PIKAN модельдерін салыстыратын құрылымды эксперименттер сериясын қамтиды. Автор нәтижелерін рецензияланған журналдарда жариялады және халықаралық конференцияларда ұсынды, бұл ұсынылған әдістеменің резервуар модельдеуінің дәлдігін жақсарту үшін ғылыми өзектілігі мен практикалық әлеуетін растайды.

Негізгі жетістіктер

Диссертацияның негізгі нәтижелерінің бірі – дәстүрлі PINN моделіне қарағанда әлдеқайда аз параметрлерді қажет ететін, бірақ дәл нәтижелер

беретін PIKAN моделінің әзірленуі. Автор сондай-ақ жасанды диффузия қосу және оқыту кезінде салмақтарды реттеу болжамдардың дәлдігін жақсартатынын көрсетеді. Модельдің өнімділігі көптеген эксперименттерде сыналып, белгілі аналитикалық шешімдермен салыстырылды, бұл ұсынылған әдістің сенімділігін растайды.

Бақылаулар мен ұсыныстар

Диссертация құрылымдық жағынан жақсы ұйымдастырылған және анық жазылған. Ол автордың физикалық процестерді де, машиналық оқытудың логикасын да түсінетінін көрсетеді. Нәтижелер сенімді және халықаралық конференциялардағы баяндамалар мен ғылыми жарияланымдармен расталған. Модельдер жақсы жұмыс істесе де, кейбір жағдайларда дәлдіктің аздап төмендеуі сияқты ұсақ шектеулер әлі де бар. Болашақта оқыту үдерісін автоматты баптау әдістерін қолдану арқылы одан әрі жетілдіруге болады.

Өзектілік, жаңалық және практикалық құндылықты бағалау

Бұл зерттеу өте өзекті, себебі көп фазалы ағынды модельдеу маңызды инженерлік міндеттерді шешуде шешуші рөл атқарады, әсіресе мұнай өндіру және жер асты суларын басқару салаларында. Кенжебек Ержан өзінің диссертациялық жұмысында PINN және PIKAN әдістерін қолдана отырып, физикаға негізделген машиналық оқыту тәсілдері арқылы мұнайды ығыстыру мәселесін шешуді ұсынады. Бұл жұмыс мұнай мен судың ығысуын сипаттайтын классикалық теорияларды сандық модельдеу және жетілдірілген есептеу әдістері арқылы дамытуға бағытталған.

Диссертацияның ғылыми жаңалығы – аталған машиналық оқыту әдістерін классикалық Бакли-Леверетт моделіне қолдануында. Зерттеу қанықтылық пен қысым өрістерін бірлесіп модельдеу мәселесін тиімді шешеді. Автор екі әдістің де өнімділігі мен бейімделгіштігін бағалайды және PIKAN дәлдікті жоғалтпай модель күрделілігін айтарлықтай азайтуға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Эксперименттік нәтижелер екі әдістің салыстырмалы тиімділігін растайды. Нәтижелер PINN әдісі қанықтылықты болжауда орташа салыстырмалы L2 қателігін 27.86%-ға, ал қысымды болжауда 44.4%-ға азайтатынын көрсетеді. Сонымен қатар, PIKAN архитектурасы оқытылатын параметрлер санын 15 есе азаюына мүмкіндік берді, бұл модельді баптаудың тиімділігін арттырды. Бұл

нәтижелер ұсынылған әдістердің ғылыми негізділігі мен практикалық әлеуетін қолдайды.

Қорытынды

Жалпы алғанда, диссертациялық жұмыс жоғары академиялық деңгейде орындалған. Әдістер жақсы түсіндірілген, эксперименттер нақты және нәтижелер теория мен тәжірибе үшін пайдалы. Кенжебек Ержанның жұмысы PhD диссертациясына қойылатын талаптарға толық сәйкес келеді. Бұл зерттеу осы саладағы ғылымға маңызды үлес қосып, мұнай резервуарын модельдеу құралдарын жетілдіруге көмектеседі. Диссертацияны қорғауға ұсынамын.

Ирина ПАНФИЛОВА /қолы/
Диссертацияның ғылыми кеңесшісі

Профессор, ENSG – LEMTA (UMR7563) – Лотарингия Университеті,
STPE магистратура бағдарламасының "Геология, Энергия және Резервуар Инжинирингі" бағытына жауапты
Тел.: (+33)3 72 74 42 78, irina.panfilova@univ-lorraine.fr

11.07.2025
Вандёвр-ле-Нанси қаласы

LEMTA
UMR 7563 CNRS – Лотарингия университеті
Форе де Хайе даңғылы, 2,
54505 Вандёвр-ле-Нанси, Франция