

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Rishabh Prakash Sharma pt. „Self-organization of flow in dissolving rocks”

**wykonanej pod kierunkiem
prof. Mariusza Bialeckiego (Instytut Geofizyki PAN)
i prof. Piotra Szymczaka (Wydział Fizyki UW)
na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego**

Rozprawa doktorska pana mgr Rishabh Prakash Sharma została zgłoszona do oceny decyzją Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego.

Dysertacja stanowi ambitne i interdyscyplinarne opracowanie problemu samoorganizacji przepływu w skałach podlegających rozpuszczaniu. Praca została przygotowana pod opieką naukową prof. Mariusza Bialeckiego (Instytut Geofizyki PAN) i prof. Piotra Szymczaka (Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego). Jest to rozprawa o wyraźnie teoretyczno-eksperymentalnym charakterze, oparta na solidnym warsztacie fizycznym, matematycznym i numerycznym, a zarazem dobrze osadzona w kontekście geologicznym i inżynierskim.

Tematem rozprawy jest badanie mechanizmów prowadzących do powstawania niestabilności reaktywno-przepływowych i formowania się wzorców kanałowych (tzw. „wormholes”) podczas rozpuszczania skał węglanowych przez przepływające przez nie roztwory reaktywne. Motywacją autora było zrozumienie fundamentalnych procesów odpowiedzialnych za samoorganizację przepływu w środowisku porowatym, które mają istotne znaczenie zarówno w naukach geologicznych (np. powstawanie struktur krasowych), jak i w zastosowaniach inżynierskich, takich jak stymulacja złóż węglowodorów czy sekwestracja CO₂. Praca ma również na celu odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób lokalne właściwości mikrostrukturalne skały wpływają na makroskopowe wzorce rozpuszczania oraz jak procesy te mogą być skutecznie modelowane i przewidywane.

Rozprawa liczy siedem rozdziałów, z czego trzy pierwsze mają charakter wprowadzający i przeglądowy, kolejne trzy stanowią oryginalny wkład autora w rozwój dziedziny, natomiast ostatni siódmy rozdział zawiera podsumowanie. Zakres pracy obejmuje:

Rozdział 1 – Introduction

W tej części Autor zawarł wprowadzenie do zjawiska formowania wzorców w układach dalekich od równowagi. Autor omawia podstawowe mechanizmy fizyczne i chemiczne prowadzące do spontanicznej organizacji przepływu w materiałach porowatych, odwołując się do klasycznych przykładów z dynamiki nieliniowej i teorii niestabilności.

Rozdział 2 – Physics of dissolution patterns

Zawiera opis fizyki procesów rozpuszczania oraz głównych parametrów bezwymiarowych (liczby Damköhlera, Pécleta). Rozdział ten stanowi gruntowne omówienie bilansu reakcji i transportu oraz wpływu tych parametrów na morfologię frontu rozpuszczania. Rozdział ten jest także miejscem, w którym Autor precyzuje tezę pracy: że morfologia i dynamika kanałów rozpuszczeniowych powstających w skałach porowatych jest w decydującym stopniu kontrolowana przez sprzężenie między lokalną strukturą porowatości, właściwościami transportowymi ośrodka a charakterem mieszania w mikroskali. Autor argumentuje, że zrozumienie tych sprzężeń i ich wpływu na przepływ reaktywny pozwala lepiej przewidywać i modelować samoorganizujące się struktury erozyjne w rzeczywistych materiałach geologicznych. Teza ta stanowi fundament zarówno dla dalszych rozważań teoretycznych, jak i dla analiz eksperymentalnych w kolejnych rozdziałach.

Rozdział 3 – Numerical modelling of dissolution process

Poświęcony modelom numerycznym rozpuszczania. Rozdział zawiera przegląd i klasyfikację modeli numerycznych stosowanych do symulacji tych procesów, w której przedstawiono systematyczną analizę różnych podejść modelowych, ze szczególnym uwzględnieniem ograniczeń modeli przepływu opartego na sieciach porów, modeli ciągłych oraz metod hybrydowych. Autor podkreśla znaczenie kompromisu między rozdzielczością geometryczną a efektywnością obliczeniową w kontekście realistycznego modelowania rozpuszczania w skałach mezoskopowych.

Rozdział 4 – Pore merging and flow focusing: Comparative study of undissolved and karstified limestone based on micro-tomography.

Poświęcony analizie geometrii wapieni krasowych. W rozdziale tym autor opisuje badania nad naturalnie zerodowanymi w wyniku procesów krasowych próbkami wapieni przy użyciu mikrotomografii. Wyniki te zostały opublikowane przez Autora w czasopiśmie *Chemical Geology* (Sharma et al., 2023). W artykule tym autor wraz ze współpracownikami przedstawił szczegółową analizę przestrzennych zmian geometrii porów na podstawie danych mikro-CT, porównując próbki wapienia nienaruszonego i zerodowanego. Kluczowym wkładem było wykazanie istotnej roli procesu łączenia się porów (pore merging) w ewolucji przepływu oraz zmniejszaniu krętności (tortuosity) i liczby kanałów przewodzących. W pracy zastosowano zaawansowane metody obrazowania i analizy geometrycznej (m.in. wskaźnik elipsoidalny, diagram Flinna, analizę lokalnej grubości i konduktywności przepływu), zaczerpnięte z wcześniejszych badań struktury kości, co podkreśla interdyscyplinarny charakter podejścia autora.

Rozdział 5 - Geometric characterization of wormhole shape in core-dissolution and influence of rock structures

Opisujący zastosowanie tomografii 4D do badania ewolucji kanałów erozyjnych. Autor zawarł tutaj ilościową analizę geometrii kanałów erozyjnych na podstawie danych eksperymentalnych z tomografii 4D (serie czasowe obrazowania tomograficznego 3D). Wyniki zawarte w tym rozdziale oparte są częściowo na badaniach opublikowanych w czasopiśmie *Advanced Water Resources* (Cooper et al., 2023), których współautorem był R. P. Sharma jak również na jeszcze nieopublikowanych materiałach. W pracy tej zaprezentowano wyniki tomografii 4D wysokiej rozdzielczości, umożliwiające śledzenie ewolucji erozji w czasie. Autor rozwinął metody segmentacji i szkieletyzacji danych obrazowych, dzięki którym możliwe było wyodrębnienie

rosnącego kanału oraz określenie jego dynamicznych właściwości geometrycznych, takich jak krętność, rozgałęzienia, zmienność przekroju czy tzw. length wastefulness. Wyniki te pozwoliły na dokładniejszy opis dynamiki czubka kanału oraz związek pomiędzy lokalną heterogenicznością skały a kierunkiem i prędkością rozwoju struktur erozyjnych. Analiza ta znacząco poszerzyła dotychczasową wiedzę na temat fizycznych mechanizmów samoorganizacji przepływu w układach porowatych.

Rozdział 6 - Effects of mixing at pore intersections on large-scale dissolution patterns

Poświęcony modelom mieszania w przecięciach porów. Cześć ta opisuje badania wpływu reguł mieszania w przecięciach porów na makroskopowe wzorce rozpuszczenia przy użyciu modelu sieci porów. Rozdział ten oparto na wynikach opublikowanych w czasopiśmie *Geophysical Research Letters* (Sharma et al., 2023). W artykule tym Autor badał, w jaki sposób różne modele mieszania – „complete mixing” i „streamline routing” – wpływają na wydajność i morfologię kanałów w porowatym ośrodku. Szczególną uwagę poświęcono przecięciom porów, które pełnią kluczową rolę w redystrybucji strumienia reaktywnego płynu. Badania wykazały, że zastosowana reguła mieszania może znacząco wpływać na efektywność rozpuszczania oraz lokalizację i kształt kanałów erozyjnych, szczególnie w ośrodkach o zróżnicowanej przepuszczalności. Wyniki te mają istotne implikacje dla modelowania rozpuszczania w skałach i pokazały, że proste modyfikacje reguł lokalnego transportu mogą prowadzić do wyraźnych zmian w makroskopowym zachowaniu układu.

Rozdział 7 - Summary

Zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. Autor syntetyzuje tutaj główne wnioski płynące z przeprowadzonych badań oraz wskazuje kierunki dalszych prac. Rozdział ten został oparty na wnioskach z poprzednich rozdziałów, w szczególności konfrontując wyniki eksperymentalne z analizą numeryczną i teoretyczną. Autor podkreśla znaczenie roli lokalnych mechanizmów mieszania i heterogeniczności geometrii porów w kształtowaniu kanałów rozpuszczeniowych, wskazując na potencjał dalszego rozwijania modeli uwzględniających rzeczywiste dane obrazowe z tomografii. Dodatkowo, w podsumowaniu autor omawia ograniczenia zastosowanych podejść oraz możliwe zastosowania wyników w praktyce geologicznej i inżynierskiej, co czyni tę część pracy ważnym elementem spajającym wszystkie wątki badawcze zawarte w rozprawie.

Rozprawa zawiera szereg istotnych i nowatorskich rezultatów. Do najważniejszych należą:

- przeprowadzenie ilościowej analizy zmian geometrii porów w wapieniach krasowych,
- opracowanie metody segmentacji i szkieletowania trójwymiarowych danych tomograficznych,
- implementacja i porównanie dwóch modeli mieszania: „complete mixing” i „streamline routing”
- analiza ewolucji czubka kanału w czasie na podstawie danych tomografii 4D.

Wyniki te zostały opublikowane w renomowanych czasopismach, m.in. *Geophysical Research Letters*, *Chemical Geology* oraz *Advanced Water Resources*.

Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością fizyki przepływu w porowatych ośrodkach reaktywnych, metod numerycznych (w tym modelowania sieciowego), technik tomografii komputerowej i analizy obrazu. Praca cechuje się wysoką rzetelnością metodologiczną i starannością.

Rozprawa jest napisana w języku angielskim w sposób jasny i precyzyjny. Struktura pracy jest przejrzysta, pojęcia są dobrze zdefiniowane, a ilustracje czytelne.

Uwagi

Brak poważnych zastrzeżeń. Poniżej zamieszczam kilka uwag i komentarzy:

- Rozprawa nie zawiera oddzielnego streszczenia, które jest standardowym elementem większości prac doktorskich. Włączenie takiego podsumowania — zarówno w języku polskim, jak i angielskim — ułatwiłoby orientację w pracy oraz jej ocenę wstępną, szczególnie dla osób spoza wąskiej dziedziny badawczej.
- Brakuje szczegółowego komentarza dotyczącego wpływu oddziaływań inercyjnych, które mogą odgrywać istotną rolę przy większych prędkościach przepływu, biorąc pod uwagę skomplikowaną geometrię i zakrzywienie kanałów. Rozprawa nie zawiera analizy liczby Reynoldsa, która mogłaby pomóc w ocenie względnego znaczenia efektów inercyjnych w różnych warunkach przepływu. Zagadnienie to może mieć szczególne znaczenie w kontekście mieszania w przecięciach porów, gdzie lokalnie zmienne prędkości i geometria mogą prowadzić do nieintuicyjnych efektów transportowych. Co najmniej dwie cytowane prace ([60] i [194]) odnoszą się do tego zagadnienia, ale nie znalazłem odpowiedniego komentarza w pracy.
- Brak opisu osi oraz legendy w Figure 4.5.
- Pewne wątpliwości budzi sposób przedstawienia warunków brzegowych w Figure 6.1 (a), gdzie zarówno ciśnienie wejściowe, jak i wyjściowe oznaczono jako równe zero, a jednocześnie analizowany jest przepływ pomiędzy wlotem i wylotem. Proszę o komentarz Autora.
- Proszę o wyjaśnienie konwencji przyjętej w rozdziale 6. W opisie modeli mieszania wielkości opisane jako wchodzące (np. „incoming concentrations”) oznaczone są symbolem „out” w indeksie górnym. Natomiast symbole odwołujące się do wielkości wychodzących (np. „outgoing concentrations”) opisane są z indeksem górnym „in”. Proszę o wytłumaczenie tej pozornie odwróconej logiki oznaczeń.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska pana Rishabh Prakash Sharma stanowi kompleksowe, interdyscyplinarne i nowatorskie opracowanie problemu samoorganizacji przepływu w porowatych skałach podlegających rozpuszczaniu. Praca łączy solidne podstawy fizyki, matematyki i obliczeń numerycznych z nowoczesnymi technikami eksperymentalnymi i obrazowaniem 3D, a zarazem czerpie z wiedzy geologicznej i inżynierskiej, co nadaje jej istotne znaczenie zarówno w naukach podstawowych, jak i w zastosowaniach praktycznych.

Głównym celem dysertacji było zrozumienie mechanizmów prowadzących do powstawania niestabilności przepływowo-reaktywnych i kanałów rozpuszczeniowych („wormholes”) w skałach węglanowych, poddanych działaniu przepływu reaktywnego. Praca skupia się na badaniu wpływu lokalnej mikrostruktury porów, reguł mieszania w mikroskali oraz właściwości transportowych ośrodka na globalne wzorce przepływu i erozji.

Rezultaty pracy zostały opublikowane w renomowanych czasopismach międzynarodowych (m.in. Chemical Geology, Geophysical Research Letters, Advanced Water Resources), co potwierdza ich znaczenie naukowe oraz jakość merytoryczną. Autor wykazał się znakomitą znajomością złożonych zagadnień fizyki przepływów w ośrodkach porowatych, umiejętnościami obliczeniowymi i eksperymentalnymi, a także zdolnością integracji różnorodnych narzędzi badawczych.

Rozprawa została napisana w sposób klarowny, logiczny i rzetelny, z przejrzystą strukturą oraz precyzyjnym językiem naukowym. Pomimo drobnych uwag, całościowa ocena pracy jest zdecydowanie pozytywna.

Rozprawa spełnia wszystkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk fizycznych, zgodnie z § 21 pkt 2–4 Załącznika nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 29 czerwca 2022 r. Przedstawiona praca wykazuje zarówno zaawansowaną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie nauk fizycznych, jak i jego umiejętność prowadzenia samodzielnych badań naukowych. Przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego związanego z mechanizmami samoorganizacji przepływu w reaktywnych ośrodkach porowatych, potwierdzone oryginalnymi wynikami opublikowanymi w renomowanych czasopismach.

W związku z przedstawioną wyżej pozytywną oceną całej pracy doktorskiej wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie pana mgr Rishabh Prakash Sharma do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

PM Korczyński