

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Rishabha Prakasha Sharmy

pt.
„Self organization of flow in dissolving rocks”

Przedstawiona mi do recenzji praca dotyczy zjawisk występujących w złożonych strukturach porowatych skał, gdzie oddziaływania przepływającego płynu oraz materiału stałego macierzy ośrodka porowatego powodują zmiany w strukturze ośrodków porowatych. W tytule rozprawy mowa jest o samoorganizacji się przepływu w rozpuszczających się skałach. Praca została wykonana pod opieką prof. Mariusza Białeckiego z Instytutu Geofizyki PAN oraz prof. Piotra Szymczaka z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Doktorant wskazuje w rozprawie cztery publikacje, z których trzy są już opublikowane. W pracach tych opublikował on częściowo swoje wyniki. W dwóch publikacjach jest pierwszym autorem na niealfabetycznej liście autorów, co sugeruje jego wiodący wkład. Są to prace w bardzo dobrych czasopismach geologicznych (IF: 4.6, 3.6, 4.0). Moja ocena dorobku doktoranta jest bardzo dobra, prace są interdyscyplinarne i ich tematyka jest spójna z tematem przedstawionej mi do oceny rozprawy.

Praca doktorska mgr. Rishaba Sharmy składa się z ponad 100 stron na które składa się 7 rozdziałów włączając wstęp i podsumowanie. Autor zaczyna od bardzo długiego wstępu, który wprowadza w zjawiska i mechanizmy fizyczne występujące w omawianych zagadnieniach.

W pierwszym rozdziale autor przekonuje nas, dlaczego zająć się problemem tworzenia się wzorów (ang. pattern formation) w zjawiskach fizycznych. W przedostatnim paragrafie na stronie 6 autor twierdzi, że “(...) This is rather unobvious to expect pattern formation in a system where a living organism is involved (...)”. Prosta kwerenda w Google Scholar podaje wiele prac o układach w których natura generuje różnego typu wzory, np.

- [1] Murray, James D. "On the mechanochemical theory of biological pattern formation with application to vasculogenesis." *Comptes rendus biologies* 326.2 (2003): 239-252.
 - [2] Demir, Esin, et al. "Dynamics of pattern formation and emergence of swarming in *Caenorhabditis elegans*." *Elife* 9 (2020): e52781.
 - [3] Gierer, Alfred, and Hans Meinhardt. "A theory of biological pattern formation." *Kybernetik* 12 (1972): 30-39.
 - [4] Koch, André-Joseph, and Hans Meinhardt. "Biological pattern formation: from basic mechanisms to complex structures." *Reviews of modern physics* 66.4 (1994): 1481
- (ograniczony wybór - bardzo dużo literatury)

Już od pierwszych stron autor bez kompleksów używa zdjęć i ilustracji zaczerpniętych z innych źródeł. Rozumiem, że autor chciał zilustrować swój przegląd i uzasadnione użycie w przypadku jednej, dwóch ważnych i niedostępnych inaczej ilustracji mógłbym zrozumieć, ale podobnie jak nie cytujemy w pracach obszernych fragmentów innych prac naukowych, tak niezbyt rozumiem tak

Małucha

szerokie używanie tyłu rysunków z innych prac jako źródeł rysunków i zdjęć (rys. 1.1, rys. 1.2, rys. 1.3, rys. 1.4 [brak źródła w b)?], rys. 1.5, rys. 1.7, rys. 1.8, rys. 1.9, 1.11, 2.11, 2.4, 2.5, 2.7, 2.8). To niepotrzebne, na tym etapie w doktoracie wystarczyłoby mi odniesienie do tych prac i tekstowy opis i wskazanie co wg autora jest najważniejsze w kontekście jego pracy. Wyjątkowe prace autora, rys. 1.10 i rys. 1.11 dużo zyskałyby na wartości, gdyby nie było tylu pięknych fotografii i wizualizacji z badań innych autorów. Objętość pracy też trochę sztucznie wzrasta w ten sposób. Doceniam jednak przegląd w całości, bo jest szeroki, nie ogranicza się do obiektów, które badał doktorant w swojej rozprawie.

Zagadnienie poruszane w pracy zostało wskazane dopiero na stronie 11 "(...) Studying the processes (...)" i dokładniej w rozdziale 1.3. Autor podkreśla tu trudności związane z badaniem struktur szczelinowych (ang. wormholes) powstających w skałach ze względu na to, że nie można do nich łatwo zajrzeć do środka. Podkreśla też trudności z badaniami eksperymentalnymi dla których próbki zwykle są bardziej jednorodne od próbek znajdujących w naturze. Zgadzam się, że zagadnienie nie jest proste.

W rozdziale 1.4 opisana jest struktura pracy. Oprócz omówienia procesów fizycznych związanych z rozpuszczaniem skał (rozdział 2), modelowania tego procesu (rozdział 3), i prezentacji wyników (rozdział 4) omówiony będzie (rozdział 5) wpływ właściwości skalnych i prędkości płynu na powstawanie tuneli w skale. Autor wskazuje również, że przedstawi wyniki prac numerycznych nad rozwiązaniem problemu przepływu w skali porów tuneli w celu wyznaczenia przepuszczalności i krętości badanych skał (strona 15). Informacja o badaniach krętości i wpływie struktury skał i prędkości przepływu na krętość jest podniesiona na końcu opisu zawartości rozdziału 5.

W rozdziale 2.2 autor twierdzi, że wpływający płyn skupia się najbardziej (prawdopodobnie chodzi o wywoływanie ciśnienia?) na wypustku (ang. bump) i przenosi więcej reaktywnego materiału w tym obszarze. Dlaczego tak się dzieje? Czy jest to efekt mechaniczny związany z dynamiką płynów w tym obszarze? Być może struktura i niejednorodność w porowatości próbki jest taka, że determinuje powstawanie ww obszarów preferowanego przepływu?

W rozdziale 2.3.1, w równaniu (2.1) autor definiuje liczbę Damköhlera jako stosunek skali czasowej transportu adwekcyjnego do skali czasowej tempa reakcji. To bardzo interesująca wielkość, ale zdefiniowana tylko dla przepływów liniowych (skala Darcy'ego). Czy można byłoby (jeśli tak, w jaki sposób?) zdefiniować taką liczbę dla przepływów wykraczających poza ten obszar fizyczny np. w zakresie przepływów spełniających równanie Forchheimera? Pytanie powstaje również dlatego, że w dalszej części autor podejmuje się próby badania charakterystyki szczelin w zależności od strumienia przepływu.

Przy wprowadzeniu podstawowych pojęć z zakresu opisu przepływów reaktywnych, jak liczby bezwymiarowe oraz głębokość penetracji autor prezentuje własny rysunek (2.2). Jest tam zaznaczona długość odcięcia, która jak rozumiem jest zdefiniowana jako pewien procent koncentracji końcowej lub różnicy koncentracji? Tu proszę o wyjaśnienie jak dokładnie wyznaczone jest lp?

Na rysunku 2.3 przedstawiony jest schemat działania stanowiska pomiarowego dla studiów nad formowaniem się wzorów przy rozpuszczaniu. Przy tego typu eksperymentach występują relatywnie duże ciśnienia, które mają na celu wywołanie przepływu przez strukturę ośrodka porowatego. Czy tak duże ciśnienia mogą wywołać efekty inercyjne i jak doktorant upewnił się o tym, że w swoich badaniach na pewno pracuje w obszarze przepływów Darcy'ego?

Doktorant używa niezbyt jasnych dla mnie terminów “Conical wormhole”, “Ramified wormhole” i “Dominant wormhole”. Domyślam się czym one są, ale czym się one charakteryzują w próbkach badanych przez doktoranta i czy ich definicje są w jakimś sensie (liczbowym) ściśle czy empiryczne i obserwacyjne? Jak liczbowo można stwierdzić, że dane pory należą do określonej klasy? Na rysunku 2.5 dodane są nawet klasy “Uniform” i “Compact”. Być może na rysunku 2.8 dałby się określić jaki rodzaj reprezentuje dane zdjęcie?

W rozdziale 2.6 wprowadzony został model służący do zobrazowania zwiększenia przepuszczalności w układzie z nowymi porami. To bardzo prosty model sprowadzający się do badania coraz węższego kawałka ośrodka porowatego. Wydaje mi się, że można byłoby podobne wnioski wysunąć dla całej próbki w której pojawia się wkład o obniżonej porowatości wprost z równań Kozeny’ego-Carmana, gdzie pojawienie się nowych porów oznacza zwiększenie porowatości. Chyba wszystkie znane mi relacje między przepuszczalnością, a porowatością dla układów naturalnych pokazują zwiększenie tej pierwszej przy zwiększaniu drugiej. W tym rozdziale pojawia się też informacja o nieliniowym zachowaniu się krzywej ΔP (rozumiem, że chodzi o relację pomiędzy ΔP , a długością kanału?). O jakie mechanizmy lub elementy można byłoby wzbogacić ten prosty model z rysunku 2.9, aby uwzględnić nieliniowość w trakcie wzrostu kanału?

Autor wspomina (strona 28), że relacja pomiędzy przepuszczalnością i porowatością nie jest prosta i mogą istnieć układy o większej porowatości, ale niższej przepuszczalności. To ciekawe stwierdzenie i mogę sobie wyobrazić sztuczne modele w których ono występuje, ale czy takie, dość osobliwe układy da się zauważyć w naturze? Być może doktorant mógłby zilustrować swoje stwierdzenie kilkoma przykładami?

W rozdziale 3 przedstawione są różne podejścia do modelowania procesów rozpuszczania. Autor dzieli je na trzy klasy: modelowanie w skali porów, modelowanie w skali ciągłej oraz modele sieciowe. Opis i podział uważam za metodologicznie poprawny. Mam pytanie dotyczące ograniczeń związanych z modelowaniem w skali porów. Czy autor wykonał próbę szacowania zapotrzebowania na moce obliczeniowe i pamięciowe związane z uruchomieniem takich obliczeń?

Następnie doktorant wprowadza model ciągły, w którym kluczową rolę odgrywa REV (elementarna próbka objętości), gdzie opis zostaje uśredniony do skali, w której zaniedbujemy pojedyncze pory. Tu autor wskazuje problemy z dokładnością opisu, gdzie zaniedbanie porów najprawdopodobniej uniemożliwiłoby obserwacje struktur będących przedmiotem jego pracy badawczej.

Trzecim modelem, którym doktorant się zajął, jest model sieciowy, w którym ośrodek składa się z połączonych porów (kapilar) z uwzględnieniem ich struktury i interakcji (w porównaniu do modelu ciągłego opartego o REV). W opisie modelu na poziomie porów pojawiają się równania Naviera-Stokes’a z cichym założeniem, że są one niezależne od czasu.

W równaniu (3.7), przy opisie prawa Kozeny’ego-Carmana nie ma ani słowa na temat źródła wprowadzonej poprawki do przepuszczalności. Czy ma ona coś wspólnego z krętością ośrodka porowatego?

W ostatnim paragrafie pod równaniem (3.11) autor błędnie nazywa równanie 3.6 równaniem przepływu (jak rozumiem równanie 3.6 jest po prostu równaniem ciągłości, tu uproszczonym dla przypadku cieczy nieściśliwej?). Doktorant wprowadza w tym rozdziale dość dokładnie model opisujący ośrodek porowaty jako sieć połączonych kanalików. Rozumiem, że taki model uwzględnia

zmieniającą się strukturę kanałów przepływu i w sposób dynamiczny zmienia strukturę lub lokalne właściwości sieci opisującej ośrodek?

W rozdziale 4 rozpoczyna się prezentacja badań i wyników doktoranta. Na rysunku 4.1 zaprezentowane są zdjęcia struktur, którymi będzie się on m.in. zajmował. Kto je wykonał?

We wstępie do rozdziału autor wspomina o tym, że badania nad wzorami powstającymi przy procesach rozpuszczania często bada się w laboratorium w skalach czasowych dużo krótszych od tych występujących w naturze. Na rysunku 4.2 przedstawione są obrazy tomograficzne próbek S1 i S2 pobranych do badań doktoranta, które pobrane zostały w dwóch wyraźnie różnych lokacjach wskazanych na rysunku 4.1 (w pobliżu i w znacznej odległości od dużej struktury szczelinowej). Tu również pytanie o wkład doktoranta do wykonanych prac. Czy doktorant brał udział fizycznie w pobraniu materiału do badań, czy został mu on dostarczony? Czy doktorant brał czynny udział w wykonaniu i opracowaniu skanów tomograficznych?

Próbki wykazują się dużą różnicą w porowatości. Jak w przypadku tych szczególnych próbek wykonany został pomiar porowatości i zapewnione zostało spełnienie normy ISO5017?. Doktorant wskazuje, że źródłem różnic w porowatości jest najprawdopodobniej wystawienie skały w otoczeniu miejsca pobrania próbki S2 na działanie wody wzbogaconej O₂. Skąd takie przypuszczenie czy woda taka została odnaleziona w tym obszarze i jej zawartość CO₂ została sprawdzona? Czy różnice w strukturze próbek mogłyby wynikać na inną ekspozycję danego miejsca na warunki zewnętrzne (np. temperaturę) i ich wpływ na charakterystyki dyfuzji, mieszania itp?

W podrozdziale 4.2.2 doktorant definiuje jedno ze swoich zadań, jako ilościową analizę różnic w szorstkości (ang. roughness) pomiędzy próbką S1 i S2. Wskazuje tu również na różnice w porowatości wynoszące 3% w obrębie próbki. Jak uzyskano tu wartość 3%? Jak duże obszary były tutaj porównywane i w jaki sposób?

W podrozdziale 4.2.3 opisana jest procedura wykonania prostej symulacji rozplywania się skał poprzez nałożenie filtrów i erozji w procedurze post-processingu. Szkoda, że autor nie zilustrował tu swoich wyników mapami powstających struktur. Czy mógłbym zobaczyć rysunki skał po wykonaniu tej procedury (kilka kroków) na próbce S1 i ich (nawet wizualne) porównanie do oryginalnego skanu skały S2? Proszę o zamieszczenie takich rysunków w prezentacji.

W omawianej procedurze nie jest dla mnie jasne czy filtr medianowy został nałożony po obliczeniu porowatości nowej próbki czy przed? Podobnie nie rozumiem po co nakładać taki filtr - myślałem, że przy prezentacji rysunków powstałych struktur, o które wyżej proszę, stanie się to jasne. Czy ta część badań wykonywana jest na próbce i jej skanie w 2D czy w pełnym obiekcie 3D reprezentującym pobraną próbkę?

Po wprowadzeniu podstawowych charakterystyk geometrycznych próbek porowatych (lokalna wielkość porów oraz właściwości topologiczne) autor opisuje właściwości fizyczne ośrodków (przepuszczalność, krętość i rozkład prędkości). W rozdziale 4.3.4 autor wspomina o tym, że do rozwiązania równania Stokesa w przestrzeni porów używana jest biblioteka Palabos. Wydaje mi się, że standardowo Palabos rozwiązuje zagadnienie transportu funkcji rozkładu prędkości odpowiadające zagadnieniu rozwiązania równań Naviera-Stokesa w przybliżeniu cieczy nieściśliwej. Proszę o doprecyzowanie jakie równania były tu rozwiązane?

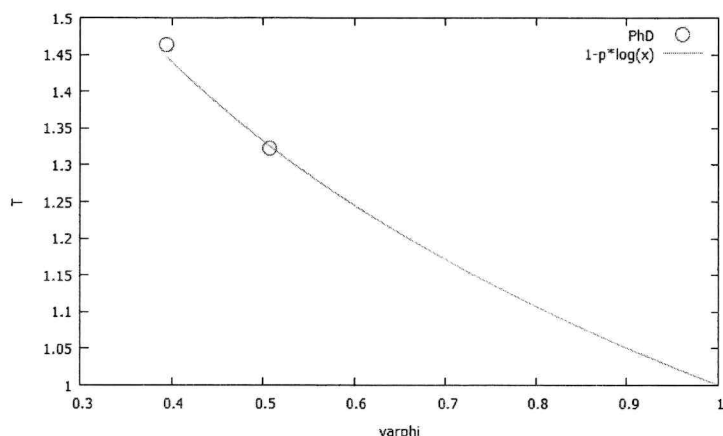
Przy opisie krętości używane jest sformułowanie, że do wyliczenia $\langle u \rangle$ we wzorze 4.1 wyznaczana jest średnia prędkość Darcy'ego. Jaka dokładnie prędkość jest tu używana, bo w pracy [169] (której jestem współautorem) nie ma mowy o prędkości Darcy'ego w definicji krętości.

W dalszej części autor przechodzi do omówienia własnych wyników. Na rysunku 4.5 brakuje opisu osi y oraz wartości liczbowych na osiach i legendy opisującej serie danych pomiaru wielkości porów dla trzech próbek. Proszę zawarcie i omówienie właściwego rysunku w ramach prezentacji. Nie podoba mi się pomysł na wygładzanie krzywych rozkładów za pomocą algorytmu Gaussa. To zaburza rzeczywisty pomiar i nie jest standardową procedurą, wołałbym zobaczyć surowe dane pomiarowe. W komplecie z pomysłem, aby wygładzić same próbki pomiarowe analiza wygląda na jakościową. Ciężko jest też zrozumieć różnice pomiędzy próbkami, które miałyby wynikać z tak przygotowanego wykresu 4.5.

Na stronie 50 po raz kolejny wspomniany jest brak gradientów porowatości w badanych próbkach. Po dyskusji nad procesami rozpuszczania na gruncie prostego modelu geometrycznego i opisie możliwego zjawiska łączenia się porów autor przechodzi do omówienia charakterystyk fizycznych związanych z transportem płynów przez próbkę odsyłając ze strony 53 do opisu w podrozdziale 4.3.4. Opis ten jest niepełny. Oprócz tego, że symulacje wykonano z użyciem biblioteki Palabos nie wiadomo kto zaprojektował i wykonał symulacje przepływu, jak został zaprojektowany układ czy próbka była 2D czy 3D, gdzie były wpływ, wypływ z próbki, jak ustalono warunki brzegowe i co napędzało przepływ? Proszę o ustosunkowanie się doktoranta do ww pytań, bo dopiero wiedząc o tych szczegółach można zrozumieć wielkości podawane dalej jako wartości pomiarów.

Za ciekawą uznaję obserwację, że stosunek przepuszczalności próbki przed rozpuszczeniem i po rozpuszczeniu nie zgadza się z przewidywaniami prawa Kozeny'ego-Carmana. Taki wynik rodzi potencjał na zrozumienie jakie wielkości kryją w sobie stałe w ww równaniach empirycznych. Tu wraca pytanie o wymiar próbki. Czy porowatość liczona jest z próbki 2D czy 3D? Szkoda, że autor nie pokusił się o uzupełnienie prawa Kozeny'ego-Carmana obliczoną z pomiarów hydrodynamicznych krętością - być może wtedy zaczęłoby ono obowiązywać, co bezpośrednio połączyłoby obliczane wielkości przepuszczalności dla tych próbek i byłoby ciekawym zastosowaniem koncepcji krętości w ogólności. Tabela 4.2 może być skorelowana z wynikami krętości i przepuszczalności. Szkoda, że autor nie przygotował podobnej tabelki krętości dla wszystkich badanych próbek (nie widzę obliczeń krętości dla S3).

Wydaje mi się, że zmniejszenie krętości ze stopniem rozpuszczenia skały może być opisane prostymi prawami empirycznymi opisującymi krętość w funkcji porowatości, np. $T(\varphi) = 1 - p \cdot \log(\varphi)$, która jest funkcją monotonicznie malejącą (ref. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.026306>). Na szybko przygotowałem taki wykres na podstawie danych z przedstawionej mi pracy i dane da się łatwo dopasować do krzywej. Brakuje oczywiście chociaż jednego pomiaru więcej, aby takie dopasowanie miało sens, dlatego, jeśli doktorant posiada dane dla próbki S3 proszę o naniesienie ich na poniższy wynik w formie punktu pomiarowego i zaprezentowanie w trakcie obrony. Z moich pobieżnych wyliczeń wynika, że krętość próbki S3 powinna wynieść około 1.4.



Wykres 4.9 wydaje się niepełny. Zaczynam podejrzewać, że autor nie wykonał symulacji przepływu płynu dla próbki S3 i stąd mamy tylko porównanie dla S1 i S2. Brakuje informacji jaka składowa prędkości była mierzona w układzie. Domyślam się, że jest to wartość bezwzględna prędkości, ale w takim razie nie rozumiem opisu osi, bo występuje litera v , gdzie wcześniej używana była u . Opis tego wykresu jest jednoznaczny (strona 55) i bardzo nieprecyzyjny. Analiza rozkładu prędkości potrafi przynieść dużo informacji, jeśli wykonać ją w sposób kompletny - osobno dla każdej składowej, opisując dokładnie warunki brzegowe przepływu, wymiarowość próbki itd. Szkoda, że ten kierunek nie został eksplorowany bardziej.

W rozdziale 5 autor zajął się charakterystyką geometrii powstających szczelin oraz wpływem struktur wewnątrz skalnych na ich powstawanie. Autor wskazuje tu, że rozdział zawiera zarówno opublikowane jak i nieopublikowane wyniki jego pracy. W tej części używa on analizy obrazów skanów tomograficznych w celu badania ewolucji w sposób ilościowy (tak pisze o tej części w swojej rozprawie). Do badań wybrane zostały dwie próbki wapienne. W tabeli 5.1 podane są przepuszczalności obu typów wapieni - nie jest dla mnie jasne skąd są te wartości, jak zostały zmierzone? W podrozdziale 5.2.2 opisana jest procedura uzyskania ww próbek, ale nie wiadomo kto ją wykonał - czy doktorant brał udział w ich pozyskaniu?

Podobnie w przypadku badań przepływów przez próbkę (5.2.3) - czy są to eksperymenty wykonane przez doktoranta?

W opisie części dotyczącej analizy obrazu autor wspomina o skalowaniu pomiarów w dół ze względu na ograniczenia sprzętowe. Jako argument podany jest tutaj potencjalny wpływ pomiaru w niższej rozdzielczości na jakość wyników i możliwość kontrolowania błędów przy skalowaniu ręcznym próbek o wyższej rozdzielczości. Czy autor faktycznie kontrolował ten proces i upewnił się, że skalowanie algorytmiczne nie wprowadza dodatkowego rozmycia do badanych danych i zachowuje się ono lepiej od pomiaru w niższej rozdzielczości? Jaki algorytm skalowania obrazu został zastosowany?

W podrozdziale 5.3, autor sprawdza jak na dokładność obliczeń charakterystyk geometrycznych wpływają rozdzielczości próbek, ale nie ma tam mowy o wpływie skalowania.

W kolejnej części opisany jest, jak zrozumiałem autorski, algorytm segmentacji danych opracowany przez doktoranta. Do wykonania szkieletu opisującego strukturę kanałów doktorant wykorzystuje wysokopoziomowe procedury z biblioteki SciPy. Ich opis jest dość pobieżny, ale rozumiem, że wg autora dostarczają opisu układu jakiego by oczekiwał (w pracy nie ma zbyt wiele nt walidacji używanych procedur np. w uproszczonych zbiorach danych).

W przypadku krętości geometrycznej (tu wypadłoby odróżnić krętość np. literką "g" od krętości hydrodynamicznej liczonej wcześniej z pola prędkości przepływu) autor używa algorytmu Dijkstry. Ten znany jest z tego, że szuka najkrótszej drogi i jak rozumiem tu szukana jest droga między początkowym punktem wpływu, a wypływem. Czy nie należałoby też uwzględnić stopnia rozłożystości głównego kanału i jego podkanałów? Taka definicja krętości - policzona ze wszystkich kanałów, a nie tylko jednego, głównego, najprawdopodobniej byłaby wyższa i lepiej oddawała charakterystykę hydrodynamiczną próbki. Jak rozumiem próbą wykonania takiego pomiaru jest "Wastefulness", jednak wydaje mi się, że nie do końca poprawne jest podzielenie tej wielkości przez odległość "ztip", która nie odzwierciedla sumarycznej długości wszystkich ramion drzewa. Zaproponowałbym tu pomiar krętości zgodnie z metodologią wprowadzoną do badania krętości naczyń krwionośnych, gdzie określa się krętość naczyń jako pofałdowanie kanału względem przebytej drogi uwzględniając drzewiasty charakter struktur. Do tego można w ogóle zmienić pomiar na oparty o lokalną krzywiznę zamiast wydłużenia drogi:

np. Hart, William E., et al. "Automated measurement of retinal vascular tortuosity." *Proceedings of the AMIA Annual Fall Symposium*. 1997. Pytanie, czy taką krętość można byłoby policzyć na danych które posiada pozostawiam do rozważenia (i być może opracowania w przyszłości) doktorantowi.

W rozdziale 5.4 autor bada rozwój szczelin w próbce PZ103 i przeprowadza dyskusję na temat fizycznych podstaw nieliniowego zachowania się ciśnienia w czasie wytwarzania się szczeliny (widoczne na wykresie 5.9). Jak występowanie obszarów o niskiej porowatości w próbce miałyby wygenerować uskoki w ciśnieniu, jeśli nie poprzez wewnętrzną niejednorodność próbki? Rozumiem, że termin "vuggy" oznacza istnienie małych szczelin, ale mechanizm jest chyba podobny, a istnienie obszarów o obniżonej porowatości determinuje istnienie obszarów o zwiększonej, czyli właśnie niejednorodność materiału?

Patrząc na wykres 5.9 chętnie zobaczyłbym wykres lokalnej porowatości (nawet policzony na całych przekrojach) wzdłuż układu - być może tu dałoby się zauważyć pewne korelacje z obserwowanymi spadkami ciśnień. Na wykresie 5.11 istnieje podobny pomiar, ale czy jest to pomiar porowatości w objętości całej próbki 3D (plastra) czy tylko intensywności koloru pobranego z zamieszczonego skanu 2D? Być może anizotropia w rozkładzie porowatości w próbce jest odpowiedzialna za powstawanie uskoków, bo patrząc na przykład na kolejne pomiary (wykres 5.14) oraz korelując je z geometrią powstających szczelin widać, że raz szczeliny powstają wzdłuż, raz w poprzek próbki. Ciekawe byłoby zbadanie mechanizmu wyboru orientacji wzrostu danego kanału i skorelowanie go z lokalnym wektorem normalnym liczonym z gradientów porowatości.

Badania krętości przedstawione na rysunku 5.15 powinny być traktowane z ostrożnością, bo początkowe wartości krętości obarczone są dużym błędem związanym z niewielką przebytą drogą (wielkości krętości rzędu 2.5 lub nawet 3.5 nie odzwierciedlają geometrii szczelin przedstawionej na skanach tomograficznych). Ciekawe byłoby wykonanie korelacji pomiędzy zmierzoną, a przewidywaną przepuszczalnością próbki po wygenerowaniu kanału biorąc pod uwagę wykonany pomiar krętości i równanie Kozeny'ego-Carmana. Podoba mi się wykres korelacji pomiędzy WL, a krętością (5.20). Na wykresie nie są jednak zaznaczone czasy pobrania danych punktów pomiarowych. Być może istnieje proste prawo łączące te dwie wielkości, a wartości odbiegające od tego prawa związane są jedynie z badaniami nad zbyt wczesnymi czasami w ewolucji tych układów?

W rozdziale 6 doktorant zająć się problemem mieszania składników na łączeniach porów w kontekście dużych struktur powstałych przy rozpyłowaniu. To ciekawy problem, gdzie mieszanie w mikroskali wpływa na struktury w dużych skalach. Na stronie 90 cytowany jest rysunek 6.1(a)

Malyk

znajdujący się na stronie 92 - taka organizacja tekstu jest bardzo uciążliwa. W tym miejscu pojawia się pytanie o motywację wybrania takiej właśnie struktury sieci, która nie odzwierciedla niejednorodnych i bardziej złożonych struktur realistycznych skał. To może być szczególne znaczenie w przypadku analizy zjawiska dyspersji typu Saffmana, wspomnianej na stronie 93, gdzie wpływ geometrii może być bardzo istotny na powstające wzorce w mieszaniu czynników. Chyba, że autor modeluje te niejednorodności zmieniając właściwości sieci, ale tu pytanie na ile są one realistyczne w stosunku do badanych próbek?

Liczba Sherwooda występująca chyba po raz pierwszy na stronie 91 nie została wcześniej zdefiniowana. Podobnie wielkość G wspominana w tym kontekście.

W podrozdziale 6.3 przeprowadzona jest dyskusja na temat niekompletnego mieszania. Tu chciałbym się zatrzymać i zapytać o fizyczny mechanizm samego procesu mieszania. Czy dobrze rozumiem, że zjawisko mieszania jest tu konsekwencją dwóch procesów - zarówno przepływu dwóch strumieni płynu jak i zjawiska dyfuzji pozwalającej na mieszanie dwóch równoległych strumieni między sobą? Jeśli tak, najprawdopodobniej czynniki takie jak właściwości chemiczne czy temperatura odgrywają tu też znaczące role, a nie tylko geometria?

Na rysunku 6.2 przedstawione zostały wyniki modelowania wzorów w rozpuszczaniu dla różnych parametrów fizycznych, np. tempa reakcji (liczba Damkholera) oraz zróżnicowania przewodnictwa hydraulicznego w próbkach. Czy program do tych symulacji i symulacje wykonane zostały przez doktoranta?

Jestem ciekawy analizy jednego ze skrajnych przypadków dużego σ^2 oraz dużej liczby Damkholera. Z czego wynika podobieństwo przedstawionych wykresów do znanych w fizyce struktur powstających w zjawisku tworzenia się agregatów w procesie ograniczonym dyfuzyjnie (DLA - Diffusion Limited Aggregate)? Czy można w jakiś sposób zmapować omawiane zjawisko na model DLA uwzględniając spacer losowy jako fundamentalny proces biorący udział w jego powstawaniu?

Na rysunku 6.5 przedstawiona jest analiza zachowania się sumy szerokości kanałów w funkcji liczby efektywnej $Deff$. Z czego wynika niemonotoniczne zachowanie się tej wielkości, szczególnie widoczne w sieciach o małym zróżnicowaniu kanałów i dlaczego efekt ten maleje wraz z rosnącym σ^2 (patrz wewnętrzny wykres w 6.5, lewy)?

Na wykresie 6.5 po prawej stronie wyznaczona została długość penetracji. Jak ją dokładnie definiujemy i czy ta wielkość nie powinna być bezpośrednio skorelowana z krętością wyznaczaną geometrycznie w poprzednich rozdziałach?

Mam ogólną uwagę do składu pracy. Użycie systemu LaTeX do składu powoduje oczywiście, że praca jest złożona porządnie, wzory są czytelne. Jedyny problem jaki miałem przy czytaniu pracy dotyczy znów ilustracji. Prawdopodobnie ze względu na ich ilość (choć w późniejszych rozdziałach, gdzie jest ich mniej problem też występuje) są one poukładane tak, że musiałem przewracać kartki, aby odszukać właściwy rysunek. Być może zmniejszenie rysunków lub użycie odpowiednich komend LaTeX pozwoliłoby poprawić skład.

Mam też pewien pomysł na koniec, być może doktorant się temu przyglądał (wtedy byłbym wdzięczny za prezentację wyników), albo przyda się to mu w dalszej pracy: wydaje mi się, że warto zbadać, jak rozkłada się energia kinetyczna w układach z rozpuszczaniem, jak proces powstawania struktur i kanałów wewnątrz wpływa na jej lokalizację, którą można scharakteryzować liczbą PI wprowadzoną w kontekście ośrodków porowatych w pracy:

Inertial effects on fluid flow through disordered porous media

JS Andrade Jr, UMS Costa, MP Almeida, HA Makse, HE Stanley

Melika

Physical Review Letters 82 (26), 5249.

Podsumowując, doktorant podjął się badań nad skomplikowanym, wieloskalowym problemem na pograniczu fizyki i chemii z bezpośrednią aplikacją w badaniu struktur geologicznych. Nie jest to prosty problem. Zuwagi na kontekst zagadnienia, nie był on osamotniony w badaniach i jego wyniki, przedstawione w ramach pracy doktorskiej, stanowią część większych projektów i współpracy (również międzynarodowej).

Po przeczytaniu pracy odnoszę wrażenie, że doktorant mógł bardziej postarać się na wskazanie swojego wkładu w powstałe publikacje, napisać wprost które z czynności pomiarowych wykonał on, a które współpracownicy w projektach. Rozumiem, że to nie było proste, aby pisać tylko o swojej pracy i jego wyniki potrzebowały kontekstu i przedstawienia również innych wyników badań czy nawet bogato ilustrowanego wstępu. Te, przedstawione w taki sposób, bez wskazania autorstwa i jasnego określenia kto, co wykonał powodują, że muszę się sam doszukiwać w tekście wkładu doktoranta. Podsumowanie osiągnięć naukowych o których wspomina on w rozdziale 7 jest bardzo pomocne. Rozumiem, że traktuje te osiągnięcia jako swoje i na tej podstawie bardzo wysoko oceniam naukową wartość przedstawionych mi wyników i pracy doktoranta. Proszę jednak o podsumowanie wkładu doktoranta w trakcie prezentacji i wskazanie, jakie prace wykonał przy każdym z osiągnięć wskazanych w tabeli 7.1. Gdzie napisał on fragment kodu, gdzie wykonał obliczenia, gdzie opracował model itp.

Wnioski z pracy są bardzo ciekawe, mnie zainteresowały głównie próba zdefiniowania krętości i powiązane z nią wyniki, widzę tu spory potencjał na dalsze prace i próbę powiązania otrzymanych wartości z przepuszczalnością badanych próbek poprzez równanie Kozeny'ego-Carmana.

Podsumowując, moja konkluzja na temat pracy jest pozytywna, spełnia ona wymogi ustawowe. Doktorant podjął się rozwiązania oryginalnego problemu naukowego związanego z opisem i modelowaniem zjawisk rozpuszczania się skał i na podstawie dostarczonej mi pracy doktorskiej oraz dorobku naukowego kandydata wnoszę o dopuszczenie go do dalszych etapów postępowania w celu nadania mu tytułu naukowego doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.



dr hab. Maciej Matyka, prof. UW
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki i Astronomii
Uniwersytet Wrocławski

