

Praca doktorska: Samoorganizacja przepływu w rozpuszczających się skałach

Autor: Rishabh Prakash Sharma

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Streszczenie

W niniejszej pracy skupiliśmy się na trzech kluczowych pytaniach dotyczących struktur rozpuszczeniowych: Jak przebiega dynamika wzrostu kanału rozpuszczeniowych i w jaki sposób struktura skały wpływa na kształt tych struktur? Jaki wpływ ma mieszanie na skrzyżowaniach porów na kształt struktur rozpuszczeniowych? I wreszcie: jak rozpuszczanie zmienia geometrię porów?

Problemy te badaliśmy, łącząc analizę danych eksperymentalnych z modelowaniem teoretycznym i numerycznym. Aby zbadać dynamikę wzrostu kanałów rozpuszczeniowych w skałach, analizowaliśmy obrazy tomograficzne (3D) oraz skany tomografii 3D wykonywane w kolejnych odstępach czasu (tzw. tomografia 4D) próbek poddanych rozpuszczaniu. Zastosowaliśmy nowatorskie metody segmentacji w celu wyodrębnienia geometrii kanałów rozpuszczeniowych ze skanów tomograficznych. Dodatkowo badaliśmy miary geometryczne, takie jak krętość oraz współczynnik nadmiaru, służące do analizy geometrii kanałów. Pokazaliśmy, że kanał rozpuszczeniowy ewoluuje w złożony sposób – przyspiesza, zwalnia i zbacza z głównego kierunku przepływu, zależnie od budowy skały i natężenia przepływu. Ustaliliśmy, że wraz ze wzrostem długości kanału zmienia się opór hydrauliczny układu, jednak związek między tymi wielkościami nie jest liniowy, jak wcześniej zakładano; dynamika tego procesu wynika z oddziaływania czubka rosnącego kanału rozpuszczeniowego z większymi strukturami skalnymi, takimi jak zbite obszary o niskiej porowatości. Te ostatnie wpływają zarówno na tempo rozwoju, jak i na morfologię kanałów: w ich obrębie kanał przemieszcza się szybciej, krócej w nich przebywa i rzadziej się rozgałęzia. Obserwacje te potwierdzono, badając geometrię kanałów w dwóch różnych typach skał.

Aby zbadać wpływ mieszania reagentów w porach skalnych na kształt struktur rozpuszczeniowych, przeprowadziliśmy symulacje numeryczne z użyciem modeli sieciowych. W modelu sieciowym przestrzeń porowa jest przedstawiona jako sieć połączonych kapilar, których średnica może wzrastać w wyniku rozpuszczania. Badania wykazały, że dynamika mieszania na skrzyżowaniach porów znacząco wpływa na morfologię i szybkość propagacji kanałów rozpuszczeniowych. W szczególności stwierdzono, że przy pośrednich wartościach liczby Damköhlera brak mieszania na skrzyżowaniach porów sprzyja szybszemu rozwojowi kanałów rozpuszczeniowych, podczas gdy zarówno przy wyższych, jak i niższych wartościach tej liczby wpływ mieszania na kształt struktur rozpuszczeniowych jest dużo słabszy.

Na koniec zbadaliśmy wpływ naturalnego rozpuszczania na geometrię porów, analizując skany tomograficzne skał krasowych. Badanie to ujawniło, że proces rozpuszczania prowadzi do istotnych zmian w strukturze porów, w tym do ich łączenia się i ogniskowania przepływu, co skutkuje lokalnym zwiększeniem grubości porów oraz zmianami w krętości przepływu. Wyniki te sugerują, że rozpuszczanie nie tylko powiększa pory, ale także tworzy preferencyjne ścieżki przepływu, znacząco zmieniając wewnętrzną strukturę skały.