

Dr hab. Jędrzej Wierzbicki, prof. UAM
Pracownia Geologii Inżynierskiej i Geotechniki
Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Maków Polnych 16, 61-606 Poznań

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. Timura Borykova

pt.

„Numerical modeling of granular material collapse in the context of analysis of Martian landslide dynamics”

Recenzję niniejszej rozprawy doktorskiej opracowałem na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk, zgodnie z decyzją z 2 lipca 2015 r., przekazaną mojej osobie pismem Zastępcy Dyrektora ds. Naukowych z dnia 16 lipca 2015 r. wraz z egzemplarzem dysertacji. Promotorem ocenianej rozprawy jest dr hab. Daniel Mege, a współpromotorem prof. dr hab. Anne Mangeney.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim i składa się ze 101 ponumerowanych stron, zawierających: tytuł, podziękowania, spis treści, tekst wraz z ilustracjami i bibliografię. Do rozprawy dołączone jest również streszczenie w języku angielskim i polskim. Oceniana dysertacja dotyczy dwóch ważnych i współczesnych problemów naukowych: modelowania numerycznego ruchu ośrodka sypkiego oraz możliwości wykorzystania tego narzędzia do interpretacji i zrozumienia mechanizmu powstawania oraz rozwoju osuwisk zaobserwowanych na powierzchni Marsa. U jej podstaw leży stwierdzenie pod koniec lat 70. XX wieku, form terenu na powierzchni Marsa, przypominających efekty działania ruchów masowych na powierzchni Ziemi. Pomimo zainteresowania świata nauki tym zjawiskiem, formy te do chwili obecnej nie doczekały się jednoznacznej interpretacji, jeśli chodzi o przyczyny powstania i mechanizm ich rozwoju. Należy zauważyć, że ponieważ wiele z rodzajów ruchów masowych występujących na Ziemi wiąże się z udziałem wody, kwestia poprawnej interpretacji obserwacji marsjańskich, może mieć istotne znaczenie w ogólnych rozważaniach dotyczących obecności wody na czwartej planecie Układu Słonecznego. Oczywiście jest, że ewidencja geologiczna, poprzez zasadę aktualizmu, jest z powodzeniem stosowana do rekonstrukcji procesów zachodzących w przeszłości na Ziemi. Pomimo jedności praw fizyki, inne środowisko planetarne, w szczególności o odmiennej dynamice atmosfery i litosfery, a także trzykrotnie mniejszej sile grawitacji, wymaga jednak bardzo ostrożnego i wieloaspektowego dostosowywania ziemskich obserwacji do przypadku Marsa.

Idea ocenianej rozprawy zasadza się na słusznym rozumowaniu, stworzenia modelu mechanizmu powstawania i rozwoju ruchu masowego, który tłumaczyłby powstanie stwierdzonych na powierzchni Marsa form terenu. Autor, dysponując narzędziami numerycznymi, oparł swoje poszukiwania na

znanych prawach fizycznych, związanych w ogólności z interakcjami pomiędzy cząstkami gruntu i zaimplementował je do opracowanego przez siebie modelu numerycznego. Niezbędną kalibrację modelu i walidację uzyskanych wyników, wykonał opierając się na doświadczalnych badaniach wcześniejszych autorów, przeprowadzonych przy podobnych założeniach. Jako modelowany ośrodek autor przyjął wyidealizowane cząstki, pozbawione kohezji, na które działają siły wynikające z grawitacji oraz interakcji międzyziarnowych (uwzględniających m. in. tarcie i wzajemne odkształcenia). Przeprowadzona analiza dotyczyła dwóch przypadków geometrii początkowej masy: osiowo-symetrycznego o pełnej swobodzie ruchu masowego i prostopadłościennego, ograniczonego z jednej strony strukturą trwałą. Przeprowadzone modelowanie numeryczne pozwoliło na obserwację zachowania się układu wyjściowego ziaren, podczas ruchu zapoczątkowanego grawitacyjnym zapadaniem się struktury, w różnych konfiguracjach dyskretyzacji ośrodka i proporcji struktury pierwotnej. W efekcie analizie poddano mechanizm rozwoju oraz geometrię struktury końcowej poszczególnych przypadków oraz podjęto próbę odniesienia uzyskanych rezultatów do obserwacji struktur marsjańskich.

W rozdziale pierwszym Autor zawarł wprowadzenie do rozprawy, wskazując niesatysfakcjonujące i dyskusyjne jego zdaniem rezultaty prowadzonych wcześniej badań mechanizmu rozwoju osuwisk marsjańskich z Valles Marineris. Przyjmując słusznie, że brak wiarygodnej interpretacji tych zjawisk wynika po części z przyjmowania nieadekwatnego do rzeczywistych warunków mechanizmu ich powstawania, Autor przeprowadził krytyczny przegląd zakładanych wcześniej mechanizmów osuwisk. W jego wyniku przyjął hipotezę mechanizmu zapadnięcia się bezkohezijnej i jednofazowej struktury ziarnowej, jako tłumaczącego w poprawny sposób powstawanie i rozwój analizowanych ruchów masowych. Jednocześnie Autor określił główne cele rozprawy jako identyfikację i zrozumienie czynników wpływających na przebieg osunięcia struktury ziarnowej w skali modelowej oraz znalezienie współczynników skalujących model numeryczny do efektów obserwowanych w naturze. Jak już wcześniej zaznaczono, do osiągnięcia przyjętych celów zastosował modelowanie numeryczne wykorzystujące metodę elementów dyskretnych (Discrete Element Method), oparte na oprogramowaniu MODY-GS, co należy uznać za właściwe. W dalszej części rozdziału pierwszego Autor przedstawił dotychczasowe osiągnięcia innych badaczy z wykorzystaniem podobnych założeń modelowych, wskazując że podstawowymi parametrami kontrolowanymi podczas eksperymentów były: kształt kolumny pierwotnej, swoboda kierunku ruchu osuwiska, proporcja kształtu (stosunek wysokości do szerokości) kolumny pierwotnej (aspect ratio), kształt ziaren i ich cechy fizyczne oraz nachylenie podstawy po której następuje ruch osuwiska. Na tej podstawie przedstawił najważniejsze założenia swojego projektu. Zauważył również, że choć już w przeszłości model numeryczny oparty na metodzie elementów dyskretnych został skalibrowany do efektów naturalnych, to zawierał on niepożądany zdaniem autora, współczynnik tarcia, będący wielkością niefizyczną. Zadaniem, które Autor nakreślił jako najważniejsze w kontekście realizacji celów, były: określenie zależności determinującej związek pomiędzy proporcją wysokości do szerokości kolumny pierwotnej a długością końcową osuwiska oraz analiza dynamiki modelowanego ruchu ziaren w odniesieniu do danych obserwacyjnych osuwisk na Marsie i Ziemi.

Rozdział drugi rozprawy stanowi zwięzłą charakterystykę osuwisk marsjańskich w kontekście topograficznym, geologicznym i mechanicznym, opartą na bogatej literaturze. Na tej podstawie Autor dokonał pewnego podsumowania cech charakterystycznych osuwisk marsjańskich, wskazując na ich pewne zróżnicowanie w zależności od lokalizacji i topografii terenu oraz proporcjonalnie znacznie większe rozmiary, niż podobnych osuwisk ziemskich. W tym kontekście słusznym posunięciem Autora

było przyjęcie do dalszej analizy wybranej grupy osuwisk o podobnych cechach, zlokalizowanych w obrębie jednej doliny. Autor przedstawił też podstawowe mechanizmy wykorzystywane do tej pory w analizie dynamiki osuwisk marsjańskich, podkreślając, że głównymi parametrami dotychczasowych modeli były parametry związane z geometrią bryły przed osunięciem i po osunięciu oraz współczynnik tarcia międzyziarnowego, a analizowane sytuacje zakładały zarówno obecność wody wolnej jak i jej brak. W rozdziale tym Autor przytoczył również jego zdaniem cztery najważniejsze mechanizmy rozprzestrzeniania się osuwisk ziemskich, związane ze zjawiskiem upłynnienia osadu oraz poślizgu na warstwie wody lub powietrza, nie przeprowadzając jednak dyskusji w kontekście warunków marsjańskich. Co ważne, Autor uznał natomiast, że w związku z różnicami skali form marsjańskich i ziemskich, zasadnym będzie przededefiniowanie współczynnika mobilności osuwiska i uwzględnienie w nim nie całkowitej wysokości ściany pierwotnej, ale jedynie miąższości sypkiego nadkładu, uruchamianego podczas procesu.

W rozdziale trzecim zawarto założenia modelu numerycznego, przeprowadzając jednocześnie dyskusję możliwych rozwiązań analizowanego zagadnienia. Jako aproksymację naturalnych cząstek gruntu, przyjęto kule, pomiędzy którymi występowały dwie składowe oddziaływania wzajemnego: styczna do powierzchni ziarna (związana z tarciem) i normalna do tej powierzchni (związaną ze sztywnością ziaren). Trafnym wyborem było zamodelowanie wzajemnych odkształceń ziaren poprzez przenikanie się kul w określonym zakresie średnicy oraz uwzględnienie w analizie siły normalnej, sztywności ziaren i współczynnika związanego z ich wielkością. Z kolei siła styczna została zamodelowana jako efekt transformacji energii kinetycznej ruchu ziarna, a jej wartość została słusznie ograniczona z góry poprzez warunek wytrzymałościowy Coulomba. Przyjęty schemat blokowy modelu numerycznego zakłada dwie podstawowe fazy jego działania: inicjujące osuwisko uwolnienie struktury początkowej i uruchomienie ziaren oraz analizę interakcji ziarnowych w czasie w kolejnych krokach modelowania, z których każdy zawierał te same elementy i stanowił odrębną pętlę obliczeniową. Autor określił również geometryczne założenia modelu, przyjmując do analizy dwa przypadki: cylindryczno-osiosymetryczny z pełną swobodą ruchu ziaren i prostopadłościenny, z ruchem ziaren ograniczonym do jednego tylko kierunku. W rozdziale tym wskazano również, że jako parametry modelu przyjęto ostatecznie: współczynnik tarcia międzyziarnowego i pomiędzy ziarnami a elementami stałymi modelu, współczynnik rozdzielczości oraz współczynnik oporu toczenia. Opierając się na wcześniejszych doświadczeniach innych autorów, w rozprawie przyjęto stałą wartość współczynnika tarcia pomiędzy ziarnami, konkludując jednocześnie, że jego wartość ma pomniejsze znaczenie w analizie dynamiki rozprzestrzeniającego się osuwiska. Na podstawie przeprowadzonych analiz, przyjęto również stałe wartości pozostałych współczynników.

Rozdział czwarty zawiera wyniki przeprowadzonej przez Doktoranta symulacji numerycznej powstającego osuwiska. Analiza wyników symulacji została przeprowadzona systematycznie, w odniesieniu do kolejnych problemów badawczych. W ogólności Autor stwierdził zgodność wyników analiz numerycznych i danych eksperymentalnych w przypadku osiosymetrycznym dla wartości współczynnika proporcji kształtu mniejszej od 1. Podał również wyniki, wskazujące na zależność średniego nachylenia końcowej powierzchni osuwiska od początkowej wartości współczynnika proporcji kształtu oraz niezależność tegoż nachylenia od współczynnika tarcia międzyziarnowego. Obok proporcji kształtu, przeanalizował także wpływ cech morfometrycznych i rozmiaru ziaren na dynamikę i morfologię osuwiska. Na podstawie uzyskanych wyników Autor stwierdził konieczność przyjęcia zmiennej wartości współczynnika skalującego zależność pomiędzy początkową i końcową geometrią mas gruntu i uzależnił jego wartość od właściwości ziaren wpływających na tarcie

pomiędzy nimi. Stwierdził również niewielki wpływ liczby ziaren przyjętej w analizie numerycznej na końcowy kształt bryły osuwiska. W dalszej części rozdziału czwartego zamieszczono analizę przemiany energii potencjalnej ziaren w ich energię kinetyczną oraz części energii, podlegającej rozproszeniu, w trakcie rozwoju osuwiska. W tym aspekcie badań zaobserwowano wyraźną zależność pomiędzy proporcjonalnym wzrostem ilości energii rozproszonej a wzrostem wartości współczynnika proporcji kształtu kolumny pierwotnej. Autor skomentował również, silne jego zdaniem, podobieństwo wyników w obydwu analizowanych przypadkach, osiowosymetrycznym i prostopadłościennym. Kolejnym, istotnym elementem przeprowadzonej analizy rozwoju osuwiska, była analiza prędkości ruchu poszczególnych ziaren w trakcie eksperymentu. Badane były zarówno składowe pionowe jak i poziome prędkości cząstek, co pozwoliło na określenie rozkładu ich wartości względem pozycji ziaren w osuwisku. Ocenie poddano również zależność prędkości od wartości współczynnika tarcia międzyziarnowego. Wykorzystując marker graficzny, Autor dokonał także oceny trajektorii poszczególnych ziaren, co pozwoliło mu stwierdzić, m. in. zależność momentu zmiany kierunku ruchu z pionowego na poziomy, a także geometrii końcowej osuwiska od wartości tarcia między ziarnami. Zastosowana metoda znakowania ziaren umożliwiła Doktorantowi jednoznaczne określenie strefy formy pierwotnej, z której pochodzą ziarna najdalej transportowane podczas ruchu masowego.

Rozdział piąty stanowi porównanie wyników uzyskanych przez Autora podczas analiz numerycznych z rezultatami badań eksperymentalnych prowadzonych przez innych badaczy, w skali laboratoryjnej. W części pierwszej rozdziału przedstawiono wyniki wcześniejszych prac doświadczalnych, ze szczególnym uwzględnieniem tych, których założenia były zgodne z prowadzonymi aktualnie analizami numerycznymi. Pozwoliło to na stwierdzenie istotnego wpływu nachylenia stałej podstawy bryły osuwiska na adekwatność modelu numerycznego do wyników naturalnych. W tym kontekście, w drugiej części rozdziału dokonano oceny możliwości przewidywania maksymalnej odległości transportu ziaren osuwiska na podstawie wyników modelowania numerycznego.

W rozdziale szóstym Autor odniósł wyniki przeprowadzonego eksperymentu numerycznego do obserwacji osuwisk marsjańskich. Rozdział ten stanowi w istocie podsumowanie wcześniejszych spostrzeżeń i próbę ich reinterpretacji w kontekście warunków marsjańskich. Główną konkluzją tego rozdziału jest stwierdzenie konieczności znacznej redukcji wartości kąta tarcia wewnętrznego w analizie numerycznej w celu uzyskania rezultatów odpowiadających rzeczywistym strukturom osuwiskowym na Marsie.

Rozdział siódmy zawiera krótką dyskusję uzyskanych wyników w odniesieniu do możliwości wykorzystania opracowanego narzędzia numerycznego do opisu formy i dynamiki istniejących osuwisk marsjańskich. Przedstawiono w nim również wnioski oraz perspektywy dalszych badań, wskazując jednocześnie sugerowane modyfikacje i kierunki rozwoju opracowanego modelu numerycznego.

2. Ocena rozprawy

Rozprawa doktorska ma charakter analityczno-eksperymentalny. Doktorant przeprowadził w niej należytą analizę dostępnych materiałów dotyczących obiektu badań oraz zastosowanego narzędzia badawczego. Sformułował hipotezę roboczą oraz wskazał zadania badawcze, których zrealizowanie założył. Uzyskane rezultaty poddane zostały dyskusji, która pozwoliła na weryfikację hipotezy roboczej, przedstawienie wniosków końcowych i perspektyw dalszych badań. Należy uznać, że oceniana rozprawa zawiera w ogólności niezbędne elementy dzieła naukowego, przedstawione w sposób logiczny i pozwalające na uzyskanie czytelnych rezultatów. Temat rozprawy należy uznać za istotny z poznawczego punktu widzenia i wpisujący się aktualne problemy badawcze. Jego realizacja niewątpliwie przyczynia się do rozwoju wiedzy o ruchach masowych i możliwościach ich modelowania numerycznego, niezależnie od środowiska występowania.

Za najważniejsze elementy rozprawy, stanowiące oryginalne osiągnięcia Doktoranta należy uznać:

- Zaproponowanie własnych założeń fizyko-mechanicznych modelu ruchu osuwiska i zaimplementowanie ich w analizie numerycznej metodą elementów dyskretnych.
- Dokonanie skalowania modelu numerycznego do warunków naturalnych, wraz z podaniem ograniczeń stosowalności tego modelu.
- Określenie stopnia wpływu geometrii podłoża nieruchomego na adekwatność modelu do warunków naturalnych.
- Określenie czynników wpływających na przebieg procesu osunięcia i stopnia ich oddziaływania na efekt końcowy ruchu masowego, w tym uwzględnienie zjawiska rozproszenia energii w opracowanym modelu osuwiska oraz ilościowe opisanie związku geometrii pierwotnej bryły gruntu i jej objętości z odległością transportu ziaren w ruchu masowym.
- Wykazanie konieczności znacznej redukcji wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu osuwiska dla uzyskania obserwowanej geometrii i wielkości osuwisk marsjańskich, co wiązać można z obecnością cieczy lub lodu w podłożu.

W szczególności należy uznać, że Autor udowodnił postawioną hipotezę o adekwatności mechanizmu zapadnięcia się bezkohezyjnej i jednofazowej struktury ziarnowej, do modelowania rozwoju i kształtu osuwiska, wskazując jednocześnie ograniczenia stosowalności tego mechanizmu. W efekcie prac badawczych opracował narzędzie modelowania numerycznego, które w określonych warunkach stosowania, daje wartościowe rezultaty, pozwalające na lepsze zrozumienie procesów zachodzących w trakcie powstawania osuwiska. Tym samym można przyjąć, że Doktorant zrealizował cele postawione we wstępie rozprawy.

3. Uwagi krytyczne i wątpliwości.

Pomimo wspomnianych wyżej walorów, praca doktorska zawiera szereg elementów dyskusyjnych, a także nieścisłości i błędów, które niestety wpływają na obniżenie ogólnej oceny dokonań Doktoranta. Do szczególnie uciążliwych dla Recenzenta, należy zaliczyć błędy edytorskie, polegające m. in. na wielokrotnych nieścisłościach pomiędzy literaturą cytowaną a spisem bibliografii.

W przypadku publikacji całości pracy lub jej fragmentów należy bezwzględnie uaktualnić spis bibliografii! Wśród uwag edytorskich należy też wymienić brak wyjaśnienia wszystkich symboli stosowanych w rozprawie, lub wyjaśnianie ich w kolejnych fragmentach tekstu, a nie przy pierwszym zastosowaniu. Prawdopodobnie w wyniku tego, w tekście pojawiają się niekiedy te same symbole użyte do określenia innych wartości fizycznych. Zdarzają się również pojedyncze literówki, przypadki braku fragmentu zdania i niejasności w opisie ilustracji. W wielu miejscach zabrakło Recenzentowi pełnych wyników prowadzonych analiz, które jako materiał dokumentujący, mogły zostać umieszczone na przykład w formie załączników.

Pewne uwagi można mieć również do przejrzystości całości tekstu, w którym z jednej strony zdarzają się pewne niedookreślenia merytoryczne (dotyczące szczególnie jasnego sprecyzowania metodyki i założeń prowadzenia analizy porównawczej), a z drugiej pojawiają się powtórzenia pewnych spostrzeżeń i stwierdzeń w kolejnych rozdziałach. Wśród wspomnianych mankamentów i wątpliwości znajdują się takie, co do których Recenzent oczekuje ustosunkowania się Doktoranta:

- Czy dane zawarte na rycinie 4.3a, pochodzą z analizy numerycznej, czy eksperymentu laboratoryjnego? Jeżeli z analizy numerycznej, to zdaniem recenzenta obserwacja o braku wpływu współczynnika tarcia międzyziarnowego na geometrię osuwiska, może wynikać z założeń i warunków działania przyjętego modelu numerycznego i niekoniecznie znajdować potwierdzenie w rzeczywistości. Czy wobec tego znane są Autorowi przykłady potwierdzające taką obserwację w naturze?
- W rozdziale 4.3 Autor stwierdza brak wpływu liczby ziaren w modelu numerycznym na rozwój osuwiska. Zdaniem Recenzenta ilustracja 4.5 wskazuje jednak na taką prawidłowość, szczególnie w odniesieniu do efektu końcowego, w którym, w przypadku minimalnej liczby ziaren występuje wyraźne spłaszczenie profilu w stosunku do przypadku maksymalnej liczby ziaren. Na jakiej podstawie Autor uznał więc tę obserwację za nieistotną?
- Jak Autor skomentuje zaobserwowany związek prędkości ziaren ze współczynnikiem tarcia (ryc. 4.9), przy zakładanym braku takiego związku z proporcją pomiędzy wysokością i długością osuwiska?
- W rozdziale 4.3 przyjęto określone licznosci ziaren w eksperymencie numerycznym. Z ilustracji 4.5 wynika, że przyjmowały one wartości pełnych setek lub tysięcy, natomiast pozostałe ilustracje wskazują na inne, zupełnie dowolne licznosci. Czy Autor przyjął w swoich badaniach jakieś określone licznosci ziaren, czy były one przypadkowe w podanym w rozprawie zakresie?
- Czy w kontekście znacznego zakresu energii rozproszonej (ryc. 4.6), przyczyn tego rozproszenia należy upatrywać w tarciu występującym pomiędzy ziarnami?
- Czy w związku z powyższym oraz w związku z przyjętym kryterium wytrzymałościowym Coulomba, które w istotny sposób uwzględnia składową pionową stanu naprężenia, Autor ma pogląd na wpływ istotnie mniejszej grawitacji na Marsie na, być może późniejsze „wygaszanie” ruchu ziaren i związane z tym większe rozmiary osuwisk marsjańskich? Czy w tym kontekście Autor nie uważa za celowe przeprowadzenia badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu wirówek (centryfug), pozwalających na modelowanie siły grawitacji?

- Na ile zdaniem Autora, wyniki analiz prowadzonych na wyidealizowanych cząstkach wirtualnych lub rzeczywistych, odnoszą się do rezultatów podobnych procesów ale zachodzących w naturalnych osadach i warunkach geologicznych?

- Jakie przyczyny, w kontekście spotykanych na Ziemi, mogły w warunkach marsjańskich zapoczątkować powstanie osuwiska?

Powyższe uwagi krytyczne i wątpliwości, nie wpływają jednak na pozytywną ocenę całości rozprawy, a jedynie wskazują na pewne elementy, które zdaniem Recenzenta mogły być w pracy udosконаlone, lub szerzej omówione.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Mgr Timur Borykov przedłożył do oceny rozprawę doktorską, która wniosła oryginalne elementy poznawcze w zakresie modelowania numerycznego ruchu ośrodka sypkiego oraz możliwości wykorzystania tego narzędzia do interpretacji i zrozumienia mechanizmu powstawania i rozwoju osuwisk zaobserwowanych na powierzchni Marsa. W świetle powyższego stwierdzenia oraz przedstawionej powyżej ogólnej oceny osiągnięć Doktoranta należy przyjąć, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane dysertacjom w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami. Wnioskuje zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. Timura Borykova pt. „Numerical modeling of granular material collapse in the context of analysis of Martian landslide dynamics” do publicznej obrony.

Dr hab. Jędrzej Wierzbicki, prof. UAM

