

**Dr hab. inż. Marek Cała, prof. nadzw.
Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki
Wydział Górnictwa i Geoinżynierii
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie**

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Krawca pt.:

Analiza wrażliwości numerycznego modelu zapadliskowego na zmianę wartości parametrów fizyko-mechanicznych metodą zbiorów losowych w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej

I. MERYTORYCZNA ZAWARTOŚĆ PRACY

W pierwszym, wstępnym rozdziale pracy zawarto obszernie jej streszczenie wraz z omówieniem treści i zawartości poszczególnych rozdziałów.

W krótkim (niespełna dwie strony) rozdziale drugim przedstawiono cel, zakres i tezy rozprawy.

Rozdział trzeci poświęcony jest obszernemu przeglądowi modeli procesu rozwoju zniszczenia w otoczeniu płytko zlokalizowanych pustek skalnych. Omówiono także tematykę natury i powstawania zapadlisk, ze szczególnym uwzględnieniem warunków płytkiej eksploatacji rud metali oraz węgla na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

W rozdziale czwartym omówiono sposoby numerycznej symulacji procesów zniszczenia, które mogą prowadzić do powstania deformacji nieciągłych powierzchni terenu w bezpośrednim sąsiedztwie rozpatrywanej pustki. Przedstawiono dokładną charakterystykę metody modelowania zaproponowanej przez Autora pracy. Wykorzystuje on do tego program Metody Różnic Skończonych FLAC2D wraz z dostępnymi tam modelami konstytutywnymi masywu skalnego. Definiuje cztery kolejne etapy rozwoju procesu zapadliskowego oraz opisuje metodykę ich numerycznej symulacji.

Rozdział piąty poświęcony jest problematyce zastosowania metody zbiorów losowych w symulacjach numerycznych powstawania i rozwoju procesów zapadliskowych. Autor przedstawia podstawy teoretyczne metody zbiorów losowych wraz z historią jej rozwoju oraz omawia szereg przykładów literaturowych dotyczących praktycznych przypadków jej zastosowania.

Analiza wrażliwości modelu numerycznego procesu zapadliskowego na zmianę wartości właściwości fizyko-mechanicznych masywu skalnego jest przedmiotem rozważań w rozdziale szóstym. Omówiono w nim zasadnicze założenia przyjęte dla rozwiązania tego

zagadnienia i na tej podstawie zbudowano algorytm oceny wrażliwości modelu numerycznego w oparciu o metody zbiorów losowych.

W rozdziale siódmym przedstawiono praktyczny przykład analizy wrażliwości modelu numerycznego procesu zapadliskowego dla warunków górniczo-geologicznych niecki bytomskiej. Zaprezentowano bardzo obszerne omówienie warunków górniczo-geologicznych dla rejonów (A i B) poddanych badaniom ujmując także rys historyczny prowadzonej tamże działalności górniczej. Dalej opisano metodykę wyznaczania właściwości masywu skalnego przedmiotowych rejonach w oparciu o badania laboratoryjne, polowe oraz klasyfikacje geomechaniczne masywu skalnego (wykorzystano do tego celu klasyfikację RMR Z.T. Bieniawskiego). Kolejnym etapem była budowa modelu numerycznego oraz analiza jego wrażliwości na zmiany wartości właściwości fizyko-mechanicznych masywu skalnego, uwieńczona analizą prawdopodobieństwa. Dla każdego rozpatrywanego rejonu wykonano ogółem po 64 symulacje numeryczne w płaskim stanie odkształcenia.

Podsumowanie przeprowadzonych wyników obliczeń i analiz zawarto w rozdziale 8. Zebrano w nim najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych studiów literaturowych, badań laboratoryjnych i polowych oraz symulacji numerycznych.

II. KRYTYCZNA OCENA PRACY

Podstawowym celem pracy było wypracowanie metodyki postępowania dla oceny wrażliwości modelu numerycznego procesu zapadliskowego, na zmiany właściwości fizyko-mechanicznych masywu skalnego w otoczeniu płytko zalegającej pustki wraz z oceną ryzyka wystąpienia procesu zapadliskowego w jej otoczeniu. Autor wykonał w tym celu dużą ilość obliczeń numerycznych oraz przeprowadził badania laboratoryjne i polowe.

Teza pracy doktorskiej jest prawidłowa i zgodna z intuicją inżynierską. Praktycznie regułą jest, że poszukiwanie rozwiązania każdego problemu z zakresu geoinżynierii, można przyrównać do rozwiązywania układu wielu równań z liczbą niewiadomych większą (niekiedy kilkukrotnie!) od liczby równań. Z podobnym zadaniem zmierzył się Autor w swojej rozprawie. Dla rozwiązania problemu niejednoznacznego określenia wartości właściwości masywu skalnego wykorzystał metody zbiorów losowych. Narzędzie to, w sprzężeniu z aplikacją symulacji numerycznych pozwoliło na wypracowanie własnej, oryginalnej metodyki postępowania dla poprawnego opisu procesów zachodzących w otoczeniu płytko zalegającej pustki.

Generalnie można uznać metodykę tę jako poprawną i należy docenić zarówno uniwersalność przedstawionego algorytmu działania jak i poprawność połączenia szeregu różnych narzędzi dla rozwiązania zagadnienia o tak dużym stopniu komplikacji. Zostało to poparte praktycznym rozwiązaniem dwóch przypadków rzeczywistych. Należy podkreślić także osobiste zaangażowanie Autora pracy i jego udział w każdym kolejnym etapie procesu ujętego przez niego później w postaci algorytmu.

Warto także zwrócić uwagę na staranną szatę graficzną recenzowanej pracy. Układ tekstu jest przejrzysty, rysunki są jasne i czytelne. Lista literatury jest dość bogata i obejmuje 111 pozycji, których duża część jest w języku angielskim.

Podczas lektury pracy nasunęło mi się wiele uwag o charakterze merytorycznym oraz pytań, które zamieszczam poniżej. Ilość przedstawionych uwag merytorycznych i komentarzy świadczy o zainteresowaniu recenzenta tą problematyką i jego przekonaniu o celowości realizacji pracy, a także kontynuacji dalszych badań w tym zakresie.

Uwagi, zastrzeżenia i komentarze merytoryczne

1. Na str. 5 pracy Autor wprowadza definicję procesu zapadliskowego i wiąże ją z głębokościami *kilkunastu, maksymalnie 100 m*. Czy jest to definicja ukuta dla potrzeb przedmiotowej pracy czy granica 100 m ma jakieś szersze uzasadnienie?
2. Na str. 11 znajdujemy następującą definicję: *...ośrodek określamy jako jednorodny jeżeli jego elementy o równej objętości mają równą masę* (Sałustowicz, 1955). Czy w danej jednostce objętości, o jednorodności ośrodka decyduje tylko masa czy także inne jego właściwości?
3. Na str. 12 podane jest, że liczbę Poissona określamy jako $m = \frac{1}{\nu}$, zaś ν to współczynnik Poissona. W kręgach naukowych nie ma obecnie pełnej jednoznaczności, czy stosunek odkształceń poziomych do pionowych nazywać współczynnikiem czy też liczbą Poissona, ale na pewno tej nazwy nie może nosić odwrotność $\frac{1}{\nu}$. (błąd ten powtarza się także na str. 22)
4. Na str. 13 znajdujemy zdanie: *...strefę rozluźnień można traktować jako pustkę w warunkach niepodpartego stropu takiej strefy wytworzonej np. w wyniku procesu sufozji, lub kompresji zawaliska*. Dostrzegam tutaj sprzeczność lub pewne niedopowiedzenie – proszę o komentarz w tej sprawie.
5. Autor pisze na str. 14 (za Goodmanem, 1989 i Bellem, 1992), że: *...w procesie zapadliskowym wytworzenie wtórnego „sklepienia ciśnień” prowadzi do zatrzymania tego procesu*. Nawet biorąc pod uwagę niekwestionowane autorytety cytowanych autorów, stwierdzam, że zdanie to jest sformułowane zbyt kategorycznie. Napisałbym raczej że *...może prowadzić do zatrzymania tego procesu*. Jakie jest zdanie Autora w tym względzie?
6. W rozdziałach 3.3.1 do 3.3.7 (strony 22 - 46) są opisane różne teorie dotyczące powstawania i propagacji zapadlisk (Jarosza i Janusza, 1976; Chudka i Ołaszowskiego, 1980; Sachsa, Skinderowicza i Zakolskiego, 1974; Goszcza, 1996; Whittakera i Reddish, 1989, 1993; Popiołka i Pileckiego, 2005 oraz różnych modeli geofizycznych). Zdecydowanie brakuje mi tutaj autokomentarza. Autor referuje tylko te teorie nie odnosząc się do nich w żaden sposób i nie próbując nawet przedstawić ich krytyki (w rozumieniu pozytywnym czy też negatywnym). Przykładowo czy Autor zgadza się z wartościami granicznymi głębokości (10 m,

30 m) podanymi w teorii Janusza i Jarosza z 1976 roku? Czy można je dalej bezkrytycznie stosować?

7. Na str. 42 pojawia się określenie *proces korozji naprężenia*. Jak to należy rozumieć?
8. Akapit na str. 65 wraz ze wzorem (5.3), jest powtórzony na stronie 67 wraz z dokładnie tym samym wzorem sygnowanym numerem (5.7). W którym miejscu bardziej pasuje do opisu metody zbiorów losowych?
9. Na str. 69 Autor powołuje się na pracę Brinkgreve'a (2000) w której obliczano współczynnik ugięcia fundamentów obiektu. Nie jest to pojęcie ogólnie stosowane – jaka jest definicja tego współczynnika?
10. Na str. 72 Autor pisze o: *...metodzie różnic skończonych DEM (ang. Differential Element Method)*. Czy mowa jest rzeczywiście o Metodzie Różnic Skończonych (FDM - Finite Difference Method) czy też o Metodzie Elementów Odrębnych (DEM - Distinct Element Method)?
11. W tabeli 7.11 na str. 118-120 jest ewidentny błąd polegający na przypisaniu wielkości wytrzymałości na rozciąganie ośrodka równej 10 000 MPa – zapewne Autorowi chodziło o wartość 0.01 MPa.
12. W podsumowaniu pracy (str. 142) Autor pisze, że: *...wartości przemieszczenia pionowego nie świadczą o możliwej propagacji procesu zapadliskowego ku powierzchni terenu*. Praca poświęcona jest metodzie przewidywania procesów zapadliskowych, czy w takim razie nie byłoby właściwsze rozpatrzenie w niej modelu numerycznego symulującego to zjawisko wraz z wystąpieniem deformacji nieciągłych na powierzchni?

Drobne usterki edytorskie przedstawione w zał. 1 zostały skonsultowane i omówione z Autorem pracy, który wykonał ich korektę.

Pytania do Autora pracy

Na 20 stronie pracy Autor pisze, że: *W przypadku wyrobiska płytko położonego, gdy naprężenie poziome jest dużo mniejsze od naprężenia pionowego oraz wytrzymałość na rozciąganie górotworu jest osłabiona np. procesem wietrzenia, wysokość zawалу jest większa i zachodzi tendencja do rozwoju procesów zapadliskowych*. O ile druga część zdania raczej nie budzi wątpliwości, to trudno zgodzić się z sugerowanymi wartościami naprężeń poziomych i pionowych. Owszem to, że naprężenia poziome powinny być zawsze mniejsze od poziomych wynika wprost z założeń teorii sprężystości (są wszak związane z współczynnikiem Poissona). Jednakowoż założenie to nie znajduje odzwierciedlenia w praktyce, wszelkie prowadzone (na całym świecie) badania wielkości składowych pierwotnego stanu naprężenia wskazują, że naprężenia poziome są z reguły większe od pionowych i to szczególnie na małych głębokościach (na dodatek tego obie składowe poziome także się od siebie różnią). W jaki sposób fakt ten rzutuje na wyniki obliczeń numerycznych przeprowadzonych w pracy?

Czy przyjęcie jako kryterium wyężenia materiału tylko naprężeń rozciągających jest prawidłowe? Praktycznie ograniczamy się tylko do analizy jednej składowej stanu naprężenia – pionowych naprężeń rozciągających (zapewne Galileusz uśmiecha się porozumiewawczo gdzieś z dalekich przestworzy). Po co w takim razie traktowanie ośrodka jako continuum sprężysto-plastyczne (czy w rozumieniu hipotezy Coulomba-Mohra czy też Hoeka-Browna)? Tam wszakże zakładamy możliwość zniszczenia ośrodka przede wszystkim przez ścinanie i w pewnym stopniu przez rozciąganie. Czy zatem nie popełniamy błędu zbyt uproszczonej analizy wyników symulacji numerycznych?

Na str. 73 Autor stwierdza, że: *Przedstawiony w rozprawie sposób rozwiązania zadania badawczego można również przeprowadzić w „prawdziwym” modelu trójwymiarowym.* W świetle dwóch wcześniejszych pytań nasuwają się poważne wątpliwości czy jest to tak oczywiste? Czy dalej decydowalibyśmy się na przyjęcie przemieszczeniowych warunków brzegowych na krawędziach bocznych modelu i bezkrytyczne stosowanie teorii sprężystości – skoro wyniki pomiarów potwierdzają różne wartości składowych naprężeń pierwotnych (i co najmniej jedną z nich większą od naprężeń pionowych). W płaskim stanie odkształcenia łatwo było stosować dla ilustracji przebiegu zjawiska λ jako stosunek pomiędzy naprężeniami poziomymi i pionowymi. A jakim stosunkiem (i których) naprężeń posługiwać się trzeba w przestrzennym stanie odkształcenia i naprężenia?

III WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana praca doktorska, pomimo zgłoszonych krytycznych uwag, jest oryginalnym rozwiązaniem zaprezentowanego w niej zagadnienia naukowego. Autor podjął w niej problem, który ma istotne znaczenie z punktu widzenia poznawczego i praktycznego. Przeprowadzając swoje wywody wykazał się dobrą znajomością ogólnej wiedzy praktycznej i teoretycznej. Warto podkreślić, że tematyka pracy bardzo dobrze rokuje pod względem kontynuacji badań w tym zakresie, chociażby w kierunkach zasugerowanych przez recenzenta (uwzględnienie pierwotnego stanu naprężenia w masywie skalny czy prowadzenie obliczeń w przestrzennym stanie naprężenia i odkształcenia).

Dlatego stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wszystkie warunki stawiane pracom doktorskim i określone w ustawie z dnia 14. 03. 2003 r. *O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* Dz.U. Nr 65, poz.595, art. 13 pkt. 1 (z późniejszymi zmianami) i może być podstawą dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Załącznik 1. Tabela błędów edytorskich w rozprawie doktorskiej

L.p.	Lokalizacja	Jest	Powinno być
1.	Str.6, wers 4d	warstwowany	uwarstwiony
2.	Str.10, wers 11d	naprężenia	naprężeń
3.	Str. 14, wers 3d	siatki	sieci
4.	Str. 22, wers 1g	elipsoida	elipsoidą
5.	Str. 26, wers 13d	Chudkach i in. (1988)	Chudka i in. (1988)
6.	Str. 52, wers 1g	ustki	puszki
7.	Str. 56, wers 9g	Diedericha	Diederichsa
8.	Str. 67, wers 2g	postępuję	postępuje
9.	Str. 76, wers 6	sa	są
10.	Str. 86, wers 15d	przyczyna	przyczyną
11.	Str.97, wers 7-8d	40	40 m
12.	Str. 109, wers 2g	metoda	metodą
13.	Str. 156, wers 16g	poweirzchni	powierzchni