

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława PANASZA
zatytułowanej: „Nieliniowe modele powłok z 6 stopniami swobody bazujące na
dwustopniowych aproksymacjach”

1. Główne założenia i zakres pracy.

Recenzowana praca poświęcona jest zagadnieniom teoretycznym i numerycznym związanym z opracowaniem i implementacją 9-cio węzłowych powłokowych elementów skończonych bazujących na kinematyce Reissnera oraz na tensorze odkształcenia Greena. Poprzez odpowiedni dobór przestrzeni konfiguracyjnej układu odniesienia ustroju powłokowego, autor wprowadził dodatkowy parametr obrotu wokół wektora normalnego do powierzchni powłoki uzyskując możliwość jego bezpośredniej prezentacji. Dla wprowadzonych elementów powłokowych autor dodatkowo zaproponował i implementował szereg modyfikacji metod pozwalających na skuteczną eliminację efektów zakleszczenia (zablokowania, przeszywnienia) od ścinania poprzecznego i zakleszczenia membranowego. W tym obszarze autor badał metodę dwustopniowej aproksymacji (ang. *Assumed Strain (AS)*) oraz metodę selektywnego zredukowanego całkowania (ang. *Selective Reduced Integration (SRI)*). Własności opracowanych elementów skończonych oraz modyfikowanych metod autor testował z wykorzystaniem profesjonalnych systemów modelowania zagadnień naukowych i inżynierskich jak ADINA, ABAQUS oraz własnymi programami bazującymi na systemie FEAP.

Autor postawił sobie zadanie wprowadzenia i weryfikacji nieliniowego modelu powłoki z sześcioma stopniami swobody wykorzystującego dwustopniową aproksymację. Proponowane aproksymacje, pozwalają na istotne ograniczenie niepożądanych efektów zakleszczenia w procesie analizy numerycznej dużych deformacji ustrojów powłokowych.

Praca składa się z 7-miu rozdziałów, spisu treści, streszczeń w języku polskim i angielskim, zestawienia oznaczeń, bibliografii o 101 pozycjach oraz krótkiego dodatku. Całość obejmuje 139 stron i zawiera 86 rysunków i 27 tabel.

Zasadniczymi częściami pracy są:

- prezentacja na gruncie mechaniki ośrodków ciągłych, równań trójwymiarowego kontinuum z uwzględnieniem wprowadzonej rotacji wokół normalnej do powłoki. Pozwalają one na wyprowadzenie odpowiednich funkcjonałów: energii odkształcenia, obciążeń zewnętrznych oraz więzów na rotacje, które po wprowadzeniu odpowiedniej aproksymacji są wykorzystane do wyprowadzenia równań dla powłok. Znajdujemy tutaj między innymi opisy kinematyki powłoki przy przyjęciu hipotezy Reissnera oraz charakterystykę związków konstytutywnych dla materiału Saint Venanta-Kirchoffa wykorzystanych w analizie.
- implementacja Metody Elementów Skończonych (MES) w zagadnieniach analizy deformacji ustrojów powłokowych. Autor, bazując na dwupolowym funkcjonałe dla trójwymiarowego kontinuum wyprowadza podstawowe charakterystyki modelu MES układu powłokowego. Wykorzystuje system *AceGen* pozwalający na automatyczne symboliczne różniczkowanie elementów wprowadzonego funkcjonału dla uzyskania

kolejnych elementów macierzy sztywności, operatora stycznego i wektora residuum. Tę część pracy autor zamyka przywołaniem technik rozwiązywania układów równań nieliniowych, metodą Newtona z możliwością śledzenia ścieżki.

- omówienie charakterystyki izoparametrycznego 9-cio węzłowego elementu powłokowego ze szczególnym uwzględnieniem zagadnienia numerycznego całkowania funkcjonu dla powłoki. Kolejnym elementem jest tutaj dobór parametru regularyzującego γ , występującego w sformułowanym przez autora dwu-polowym funkcjonale powłoki. Jest on proponowany jako wartość optymalna z przeprowadzonych testów numerycznych.
- przeprowadzenie analizy wpływu początkowych zniekształceń elementu (odejście od regularnego rozmieszczenia węzłów) na poprawność aproksymacji.
- kompleksowa analiza zagadnienia zakleszczenia elementów powłokowych na przykładzie elementu belkowego ze wskazaniem sposobów jego eliminacji poprzez wprowadzenie całkowania zredukowanego oraz dwustopniowej aproksymacji odkształceń. Na tej bazie, opracowanie powłokowego elementu skończonego 9-AS, dla którego wprowadzono dwustopniową aproksymację odkształceń oraz łączne traktowanie próbkowania i całkowania numerycznego.
- zastosowanie metody dwustopniowej aproksymacji dla pola gradientu przemieszczenia implementowane w autorskim elemencie 9-ADG (ang. *Assumed Displacement Gradient*) oraz analiza efektywności metody selektywnego całkowania w elemencie 9-SRI.
- numeryczna weryfikacja własności wprowadzonych elementów skończonych 9-AS, 9-AGD, 9-SRI w szeregu testach numerycznych, (*patch tests*) dotyczących prostych układów elementowych jak również złożonych konstrukcji inżynierskich.

2. Ogólne uwagi o pracy.

Praca dotyczy trudnej tematyki związanej z opracowaniem i weryfikacją 9-cio węzłowych elementów powłokowych wykorzystywanych w modelowaniu dużych deformacji (przemieszczeń i rotacji) ustrojów powłokowych. W pracy implementowano szereg modyfikacji metody dwustopniowej aproksymacji, pozwalających na eliminację zarówno zakleszczenia od ścinania poprzecznego jak i membranowego. Jest ono efektem bardzo niepożądanym, wynikającym między innymi z niedopasowania aproksymacji poszczególnych członów energii poprzez funkcje aproksymujące niskiego rzędu. Rozprawa ma charakter teoretyczno obliczeniowy. Rozważana tematyka lokalizuje pracę w obszarze metod komputerowych mechaniki na kierunku badań związanym z rozwojem numerycznych metod aproksymacji. Jej celem jest rozwijanie i poprawianie efektywności metod numerycznego modelowania deformacji złożonych układów inżynierskich metodą elementów skończonych.

W trakcie czytania rozprawy recenzentowi nasunęły się następujące uwagi ogólne, które w tym miejscu chciałbym poruszyć:

1. Zdaniem recenzenta autor bardzo precyzyjnie przeprowadził czytelnika przez zagadnienia związane z wyprowadzeniem równań powłoki w trójwymiarowym kontinuum. Właściwie przedstawił kinematykę i odkształcenia powłoki operując odpowiednimi gradientami przemieszczenia i deformacji. W tym miejscu nie do końca jest jasne pojęcie konfiguracji naturalnej. Czy jest ona jedynie niezdeformowaną konfiguracją początkową bez naprężeń wstępnych? W literaturze często konfiguracja naturalna jest interpretowana jako konwekcyjny układ współrzędnych materialnych. Biorąc pod uwagę dopuszczenie dużych deformacji pojawia się konieczność wprowadzenia tzw. konfiguracji odniesienia. Czy w pracy pokrywa się ona z konfiguracją początkową?

2. Ciekawym podejściem jest wykorzystanie programu AceGen w procedurach automatycznego obliczania elementów stycznej macierzy sztywności. Autor zauważa, iż realizowane tak różniczkowanie jest uwarunkowane ilością stopni swobody dając dla dużych n efektywniejsze algorytmy. Czy autor mógłby wyjaśnić jak rozumie tutaj pojęcie efektywności?
3. W rozdziale 4.5 pracy przedstawiono analizę wartości własnych macierzy sztywności wprowadzonego elementu (z rotacją normalną). Zdaniem recenzenta powinien być wskazany w treści punktu cel takiej analizy wyjaśniany dopiero w pkt. 6.1.
4. Porównując metody AS i ANS (ang. *Assumed Natural Strains*) w punkcie 5.2.3 autor mówi o wolnej zbieżności (str 72/2). Dla takiego stwierdzenia konieczne wydaje się przeprowadzenie analizy tempa zbieżności przy odpowiedniej aproksymacji uzyskiwanych wyników.
5. W szeregu testach numerycznych autor stwierdza, iż elementy 9-węzłowe analizowane w pracy przechodzą testy pozytywnie (por. np. str.82/12). Czy rozumie przez to że wyniki są identyczne? Nie ma mowy o żadnych błędach, choć porównujemy rozwiązania uzyskane numerycznie z analitycznymi?

3. Uwagi szczegółowe

- str.32/1 warunek 3.25 dla zagadnień nieliniowych nie jest dobrze zapisany? Dla ujemnych przyrostów zmiennych kinematycznych, które w procesie iteracyjnym mogą wystąpić, nastąpi przerwanie procesu iteracji bez uzyskania stanu równowagi. Ponadto zdaniem recenzenta prawa strona 3.25 powinna uwzględniać poziom deformacji (por. warunek iteracji w systemie FEAP).
- str. 36/1 53^3 kolizja oznaczeń symbolu I (raz jest indeksem, a raz momentem bezwładności).
- drobne literówki (raczej nieuniknione (*sic.*)) $41/2$, $55/2$, lapsus językowy $96/3$..grubość jest prostopadła....
- fatalne są, zdaniem recenzenta, opisy rysunków, brak jednostek fizycznych we wszystkich realizowanych przykładach numerycznych, opisach rysunków i tabel. Zdaniem recenzenta, pomimo testowego charakteru realizowanych zadań, mających pokazać przede wszystkim efektywność zbudowanych elementów, modelowane są konstrukcje inżynierskie (wsporniki, powłoka cylindryczna, membrana Cooka, Hak Raascha i inne), dla których jak najbardziej wskazane jest określanie jednostek.
- rys.4.4. i 4.5 'gamma' – raczej γ ; 5.12 i 5.13 brak linii osi ξ ; brak polskich liter ϵ , α ... w legendach rysunków i wykresów: np. 5.16; w polskiej nomenklaturze ułamki dziesiętne powinny być pisane z przecinkiem, nie z kropką (uwaga do wszystkich rezultatów numerycznych i danych).
- w opisie tabeli 4.2 określono, iż element ma wartości własne?
- z rysunku 6.2. wynika, np. współrzędna x-owa pkt. 1 jest większa od współrzędnej x-owej pkt. 20. Natomiast z tabeli 6.4 wynika coś innego. Czy jest zgodność między rys. 6.2 i tab. 6.4?
- w dysertacji powinna zostać zamieszczona informacja o prawach do wykorzystania wyników uzyskiwanych z pomocą profesjonalnych systemów ADINA, ABAQUS, oraz AceGen, nr licencji itd.

Recenzent podkreśla z naciskiem, że przedstawione powyżej uwagi ogólne i szczegółowe nie mają zasadniczego wpływu, na niewątpliwie wysoką ocenę ogólną poziomu recenzowanej rozprawy.

4. Ocena pracy i wniosek końcowy

Tematyka pracy ma duże znaczenie praktyczne, może jednak także, ze względu na swą złożoność i różnorodność, stanowić dla naukowca duże wyzwanie poznawcze, przynoszące satysfakcje badawczą. Temat pracy umożliwia więc spełnienie wszystkich wymagań stawianych rozprawom doktorskim z zakresu metod komputerowych mechaniki.

Realizację postawionego zadania ocenić należy pozytywnie, ze względu na oryginalność analizy, rzeczowy sposób prezentacji uzyskanych wyników oraz sumiennosc wykonania poszczególnych etapów pracy. W dysertacji mgr inż. Przemysława PANASZA znalazłem szereg elementów oryginalnych, będących wynikiem wieloletnich prac badawczych doktoranta, o charakterze zarówno poznawczym jak i praktycznym, inżynierskim. W szczególności podkreślić należy:

- a) Dojrzały pod względem naukowym i poprawny logicznie sposób przedstawienia osiągniętych istotnych rezultatów badawczych.
- b) Opracowanie podstaw teoretycznych nowych 9-węzłowych elementów powłokowych uwzględniających duże rotacje wokół wektora normalnego do powierzchni powłoki.
- c) Zaproponowanie szeregu modyfikacji metody dwustopniowej aproksymacji odkształceń dla uzyskania racjonalnych technik analizy ustrojów powłokowych, eliminujących niepożądane efekty zakleszczenia rozwiązania.
- d) Wyselekcjonowanie w ramach technik selektywnego zredukowanego całkowania odpowiednio niskich reguł całkowania przy zachowaniu bardzo dobrej efektywności elementu.
- e) Wskazanie na problemy z dokładnością obliczeń pojawiające się jako wynik początkowych zniekształceń elementów skończonych (ich nieregularności).
- f) Kompleksowość i wielowariantowość symulacji numerycznych potwierdzających bardzo dobre własności opracowanych przez autora elementów. W tym miejscu doktorant pokazał, jak szeroką gamę testów bazowych trzeba przeprowadzić dla uzyskania potwierdzenia o poprawności prowadzonych w pracy analiz.

W pracy podjęto temat ważny, którego opracowanie zmierzało do udoskonalenia metod aproksymacji dyskretnych zagadnień mechaniki obliczeniowej w aspekcie podnoszenia efektywności symulacji zagadnień inżynierskich metodą elementów skończonych. Dobór tematu cechuje odwaga badawcza i dobre rozeznanie istotnych problemów stojących przed współczesnym naukowcem i inżynierem. W swojej rozprawie Autor udowodnił, że potrafi samodzielnie rozwiązywać złożone problemy z zakresu metod komputerowych mechaniki, łącząc bardzo dobrą znajomość teorii z umiejętnością nowoczesnego myślenia w kategoriach rozwiązywania ważnych problemów brzegowych.

W związku z powyższą opinią stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława PANASZA spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez odpowiednią ustawę i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

