

**Al. Armii Krajowej 21**  
**42-201 Częstochowa**

tel.: (034) 3250505; fax: (034) 3250555

e-mail: artur.tyliszczak@pcz.pl

Częstochowa, 19.07.2022

### **Recenzja**

#### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Nowaka „Development of numerical model for modeling artificial heart valves for performing virtual therapies”**

Recenzja została opracowana na zlecenie Prof. dr hab. inż. Marka Gzika zawarte w skierowanym do mnie piśmie z dnia 2 czerwca 2022r.

#### **1. Ocena ogólna.**

Tematyka pracy dotyczy numerycznego modelowania przepływów newtonowskich i nienewtonowskich przez sztuczne zastawki aortalne. W pracy skoncentrowano się na zastosowaniu i adaptacji komercyjnego oprogramowania ANSYS oraz oprogramowania uczelnianego do rozwiązania istotnego problemu inżynierskiego. **W mojej ocenie temat pracy i użyte w niej metody analizy rozpatrywanych zagadnień pozwalają zakwalifikować ją do dyscypliny inżynieria biomedyczna.**

Zasadniczym celem pracy było stworzenie metodyki symulacji i narzędzia numerycznego pozwalającego na modelowanie CFD przepływu krwi w układzie krwionośnym człowieka w sąsiedztwie i poprzez zastawki sercowe aortalne z uwzględnieniem ruchu ich łopatek oraz odkształceń tkanek. Ze względu na specyfikę zagadnienia prowadzenie badań eksperymentalnych na rzeczywistym „obiekcie w warunkach pracy” jest niezwykle trudne i wymaga stosowania nieinwazyjnych technik pomiarowych bazujących głównie na obrazowaniu pola przepływu i odkształceń tkanek miękkich. To sprawia, że dostępne wyniki eksperymentalne są niejednokrotnie mało precyzyjne i niekompletne w porównaniu do wyników typowo uzyskiwanych w badaniach zagadnień przepływowych. Co więcej, wyniki tego typu badań ciężko jest uogólniać ze względu na niepowtarzalność „objektu badań”. W pracy, w sposób niejawni postawiono tezę, że wykorzystanie w tym celu nowoczesnych metod CFD pozwoli na wnikliwą analizę pola przepływu i odkształceń tkanek i umożliwi ocenę skuteczności pracy zastawek sercowych w różnych warunkach.

W pracy skoncentrowano się głównie na zagadnieniach technicznych związanych z tworzeniem różnego typu siatek obliczeniowych, algorytmie determinującym ruch łopatek zastawek oraz porównaniach różnych wariantów modelowania pola przepływu. Mniej uwagi poświęcono efektywności i prawidłowości pracy zastawek. Przyjęte metody opisu wykonanych prac, analiza wyników oraz ich prezentacja i weryfikacja za pomocą dostępnych danych eksperymentalnych są prawidłowe. **Praca jest oryginalna i reprezentuje stopień złożoności zwyczajowo spotykany w pracach doktorskich. Wykonywana była w ramach projektów NCN i NCBiR.**

## 2. Ocena szczegółowa.

Praca została napisana w języku angielskim dzięki czemu może służyć jako pomoc naukowa szerokiemu gronu naukowców. Układ pracy jest typowy do tego jaki dotychczas spotykałem w recenzowanych przeze mnie pracach doktorskich. Zasadnicza jej część składa się z wprowadzenia, czterech rozdziałów opisujących model matematyczny, wyniki weryfikacji uzyskanych rezultatów symulacji, wyniki porównań pól przepływu poprzez zastawkę anatomiczną i sztuczną oraz podsumowania. Spis literatury jest bardzo obszerny i zawiera 169 pozycji, w tym 6 pozycji, których doktorant jest współautorem. Cytowane artykuły są aktualne i zostały opublikowane przez uznane wydawnictwa. W pracy zamieszczono również trzy dodatki, w których przedstawiono dwa skrypty przygotowane przez doktoranta w języku Python do analizy położenia łopatek zastawek na podstawie zdjęć oraz skrypt UDF (User Defined Function) definiujący zmianę siatki obliczeniowej w trakcie ruchu łopatek zastawki.

Przegląd literatury przedstawiony we wprowadzeniu jest bardzo obszerny. Pokazuje on aktualny stan wiedzy na temat stosowania zastawek serca, problemów z tym związanych oraz metodyki badań mających na celu ich ulepszenie i analizę efektywności działania. We wprowadzeniu przedstawiono również zakres, cel i streszczenie prac wykonanych w ramach realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej. W mojej ocenie niepotrzebnie pewne informacje są powtarzane w kolejnych podrozdziałach przez co odnosi się wrażenie jakby niektóre fragmenty pracy zostały bezpośrednio przeniesione z wcześniejszych raportów lub artykułów doktoranta bez uwzględnienia faktu, że dana informacja została już wcześniej podana. Ta uwaga dotyczy także kolejnych rozdziałów, przy czym nie zmniejsza ona merytorycznej wartości pracy.

W wykonanych w pracy symulacjach stosowano program 6DOF oraz program ANSYS wraz z przygotowanymi procedurami UDF. W rozdziale 2 przedstawiono dwa typy siatki obliczeniowej stosowanej przy zmieniającej się w czasie geometrii obszaru obliczeniowego, tzw. siatkę typu overset oraz siatkę dynamiczną. Po przeczytaniu tej części pracy oraz szczegółowych opisów tego zagadnienia w kolejnych rozdziałach, nie mam wątpliwości, że doktorant posiada w tym temacie bardzo dużą wiedzę i praktyczne umiejętności. W rozdziale 2 przedstawiono również model matematyczny ruchu płynu. Po przeczytaniu tego fragmentu pracy doszedłem do wniosku, że lepiej by było, aby doktorant ominął to zagadnienie i krótko napisał jakie modele stosował. W przedstawionych przez doktoranta wzorach jest sporo błędów i nieścisłości. Przykładowo, czy zmienne definiujące gęstość, czas, lepkość w równaniach 2.1-2.2 nie powinny być takie same jak w równaniach 2.12-2.13. Nieprawdą jest, że w przepływie nieściślimym pochodna gęstości po czasie równa jest zero, tak jest tylko wtedy, gdy gęstość jest stała, a tak w przepływie nieściślimym nie musi być. Gdzie są stosowane formuły 2.7 i 2.8? W równaniu 2.9 indeks sumy w mianowniku jest błędny. Jak należy rozumieć fakt, że rozwiązywanie problemu w ujęciu 'non-conservative' nie stanowi problemu, gdy rozwiązanie jest zbieżne. Czy należy przez to rozumieć, że nawet jeśli rozwiązanie jest zbieżne, na przykład bez spełnienia warunku zachowania masy, to jest ono poprawne? W definicji liczby Reynoldsa w rozdz. 2.3 zmienna 'd' w ogólności jest charakterystycznym wymiarem liniowym, niekoniecznie średnicą, a zmienna 'u' jest modulem prędkości, a nie prędkością. Jak zdefiniowana jest lepkość turbulentna w rów. 2.12-2.13? W równaniu 2.14 definiowany jest symbol  $\eta$ . Czy oby na pewno o to chodziło?

Przecież  $\nu$  używane jest jako lepkość w definicji liczby Reynoldsa. Brak konsekwencji w oznaczeniach! Czy oznaczenia składowych prędkości występujące w rów. 2.15, napisane dużymi literami, oznaczają jakieś inne prędkości niż te występujące w pozostałych równaniach? W równaniu 2.15  $\Omega$  powinno mieć indeksy 'ij'. Ile wynoszą liczby Prandta występujące w rów. 2.12-2.13 oraz 2.16-2.17? Swoją drogą 2.16-2.17 nie są równaniami dla „model constants” jak napisano linijkę powyżej. Jak należy rozumieć „ $\gamma$  is the gradient in streamwise velocity in the direction perpendicular to velocity”? Rozdział 2.5 dotyczy bardzo ważnego zagadnienia, tj. warunków brzegowych na wyplywie, którym poświęcono w pracy sporo uwagi. Nie rozumiem w jaki sposób uzyskano równanie 2.19 na podstawie 2.20. Nie wydaje się to aż tak trywialne jak można by wnioskować na podstawie przedstawionego opisu. W rozdziale 2.6 przedstawiono algorytm programu 6DOF do analizy oddziaływania pomiędzy płynem i ciałem stałym. Jak należy rozumieć sformułowanie „Second, it was not clear to us.....” Jakich „nas” doktorant ma na myśli. Równania 2.22 i 2.23 nie prowadzą do 2.24. Co oznacza „body's momentum of momentum”? Równanie 2.27 (brak oznaczenia modułu w pierwszym członie), które doktorant traktuje jako jeden z elementów nowatorskich pracy, wyprowadzono na podstawie 2.26. Było to możliwe tylko przy założeniu, że krok czasowy jest dodatni, gdyż inaczej nie można by go „wyciągnąć” spod znaku modułu w 2.26. Rozwiązanie równania (nie funkcji jak napisano w pracy) dostarcza dwóch rozwiązań dla kroku czasowego: dodatniego i ujemnego. Czy doktorant nie widzi tutaj pewnej niekonsekwencji? W równaniu 2.34 występuje zmienna  $\omega$ , która poprzednio oznaczała prędkość kątową i tak też napisano w spisie oznaczeń. Tym razem oznacza współczynnik podrelaksacji. Jeśli jest on równy 1, jak napisano, to lepiej było by ten człon zupełnie ominąć niż wprowadzać bałagan w oznaczeniach. Zmienna  $\phi$  z indeksami curr i prev nie oznacza bieżącej i poprzedniej iteracji tylko wartość  $\phi$  w bieżącej i poprzedniej iteracji. Błędów podobnych do tych wymienionych powyżej jest jeszcze kilka, niejednoznaczności w sformułowaniach też, również w dalszej części pracy. Generalnie, uważam, że rozdział 2 został napisany niestarannie i jakby w pośpiechu kopiowane były równania z różnych źródeł. Wierzę jednak, że tego typu błędy nie miały miejsca w przygotowanych przez doktorantach skryptach.

Rozdział 3 dotyczy modelowania przepływu przez sztuczną zastawkę aortalną. Sporo uwagi poświęcono w nim metodom generowania siatki obliczeniowej. Jest to dobrze napisany rozdział pracy. Proszę o informację, czy w wykonanych symulacjach stosowano funkcje ściany (jakie) i ile wynosił parametr  $y^+$  przy stosowaniu 7 warstw komórek przyściennych. Rysunek 3.5 pokazuje porównanie wyników symulacji uzyskanych bez modelu przepływu turbulentnego oraz z dwoma opisanymi uprzednio modelami na 3 siatkach obliczeniowych o różnych liczbach węzłów. Widać na nim, że siatka „medium” zapewnia uzyskanie wyników praktycznie niezależnych od liczby węzłów. Proszę jednak o przedstawianie porównania wyników na jednym wykresie uzyskanych na siatce „medium” i „fine” bez modelu przepływu turbulentnego oraz z dwoma modelami. Proszę o przedstawienie zmienności przestrzennej i czasowej wartości lepkości turbulentnej. To pokaże czy stosowanie modelu przepływu turbulentnego miało sens i będzie to bardziej miarodajne niż argumentacja „że tak” na podstawie wyników przedstawionych na rys. 3.10, który błędnie pokazuje, że lokalna wartość liczby Reynoldsa jest największa w okolicy ścian. Otóż, przy liczbie Reynoldsa zdefiniowanej w oparciu o średnicę zastępczą i średnią prędkość, rys. 3.10 pokazuje jedynie trend zmienności lepkości wyznaczanej na podstawie 2.18. Jest ona największa przy ścianie, gdzie naprężenia są największe. Proszę mnie poprawić, jeśli nie mam racji. W rozdziale 3.3

przedstawiono ustawienia modelu. Proszę o informację, dlaczego do rozwiązania rów. 2.19 konieczne było stosowanie metody R-K, aż 4. rzędu. Swoją drogą sformułowanie „ $O(h^5)$  is called 4-th order error” jest błędne. To jest błąd metody R-K na poziomie 5. rzędu. Dlatego mówi się, że metoda R-K zdefiniowana przez 3.1 jest 4. rzędu, bo z wyrazami 4. rzędu szeregu Taylora jest zgodna. Proszę o informację w jaki sposób wyznaczono TKE w  $J/m^3$  przy definicji TKE (3.3) w  $m^2/s^2$ . W linijce nad rys. 3.11 jest błędne odwołanie do 4.15. Na rys. 3.13 nie ma „red curve” w mojej wersji pracy. Mimo to wynik na nim przedstawiony jest bardzo interesujący i ważny. Pokazuje, gdzie tworzą się obszary recyrkulacji i gdzie, i w której fazie przepływu można spodziewać się dużych naprężeń ścinających niszczących płytki krwi. W odniesieniu do rys. 3.15 mowa jest o kawitacji. Czy na podstawie przedstawionych na nim wyników można by się jej spodziewać? Nie rozumiem, dlaczego dyskusja tych wyników, przedstawionych w Pascalach, jest następnie (str. 73) kontynuowana w oparciu o mmHg. Czy ja czegoś nie zrozumiałem pomiędzy tymi fragmentami pracy. Szkoda, że nie pokazano podobnie jak na rys. 3.15, w jaki sposób zmieniają się naprężenia maksymalne na łopatkach zastawki. Zaskakująco małe są różnice w wynikach symulacji dla przypadku z/bez zastawki pokazane na rys. 3.18 i 3.19. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego tak jest.

Rozdział 4 dotyczy rozbudowy modelu FSI na potrzeby analizy przepływu przez zastawkę mechaniczną oraz jego weryfikacji na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Tak jak poprzednio proszę o podanie wartości  $\gamma$  w wykonanych symulacjach. Na Rys. 4.1D zaznaczony kąt raczej nie jest równy 25deg. Generalnie, rozdział ten jest dobrze napisany, a badania w nim przedstawione z pewnością wymagały dużego nakładu pracy. Uzyskane wyniki symulacji bardzo dobrze w mojej ocenie zgadzają się z danymi eksperymentalnymi, co potwierdza, że przygotowane przez doktoranta procedury są pozbawione „grubych” błędów. Wnioski płynące z porównań symulacji wykonanych na siatce typu overset i dynamicznej są bardzo ciekawe i trochę zaskakujące.

Rozdział 5 poświęcony jest analizie i porównaniu przepływu przez zastawkę o anatomicznym deformowalnym kształcie i zastawkę sztuczną z uwzględnieniem ich zwężenia w wyniku kilku faz zwapnienia. Jest to bardzo wartościowy fragment pracy, pomimo iż, ze względu na koszty obliczeniowe większość obliczeń wykonano w oparciu o model 2D. Nie rozumiem informacji, że „The artificial valve geometry was created based on the user manual.” Wyniki symulacji dobrze zgadzają się z danymi eksperymentalnymi (rys. 5.11 i 5.12). Bardzo ciekawy jest wynik pokazujący, że do zamknięcia zastawki anatomicznej wystarczy spowolnienie przepływu, podczas gdy do zamknięcia zastawki sztucznej niezbędny jest przepływ zwrotny. Proszę o przedstawienie rys. 5.16 w tej samej skali kolorów po lewej i prawej stronie poszczególnych rysunków.

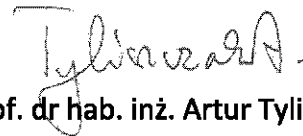
Pracę kończy podsumowanie właściwie opisujące zakres badań i uzyskanych wyników oraz wskazanie przyszłych kierunków prac.

Lektura pracy nasuwa mi jeszcze jedno pytanie. W symulacjach uwzględniono wpływ pola przepływu na prędkość, odkształcenie i otwarcie zastawek. Dlaczego w symulacjach nie uwzględniono wpływu elastyczności zastawek, które zamykając się oddziałują na płyn? Wniosek ten wyciągnąłem na podstawie opisu modelu, w którym nie ma członów odpowiedzialnych za tego typu oddziaływania.

Praca jest napisana w sposób jasny i komunikatywny. Zauważyłem sporo błędów językowych, ale praca jest zrozumiała i będzie czytelna zarówno dla „native speakerów” jak i dla pozostałych osób. W żaden sposób tego typu błędy, które niestety większość z nas popełnia, nie wpływają na moją merytoryczną ocenę pracy. Błędy w opisie modelu matematycznego, o których pisałem w recenzji, podejrzewam, że wyniknęły nie tyle z niewiedzy i niestaranności doktoranta, ale z pośpiechu wymuszonego terminem złożenia pracy. **Bez wątplenia przedstawiona praca wystawia pozytywne świadectwo wiedzy i umiejętnościom doktoranta. Uzyskane przez niego wyniki i przygotowane oprogramowanie stanowią wartościowy wkład w rozwój metod CFD.**

### **3. Konkluzja**

Reasumując, przedstawiona do recenzji rozprawa jest w mojej ocenie rozwiązaniem złożonego zadania naukowego. Doktorant wniósł oryginalny wkład w rozwój narzędzi obliczeniowej mechaniki płynów. Przygotowane przez niego metody i narzędzia numeryczne będą z pewnością wykorzystywane w przyszłości, a uzyskane wyniki mają dużą wartość poznawczą. Pozwala to stwierdzić, że zrealizowane zostały założone cele pracy. Przedstawiona rozprawa doktorska dowodzi wiedzy doktoranta w zakresie modelowania numerycznego przepływów i wykorzystania komercyjnych narzędzi obliczeniowych oraz stanowi potwierdzenie umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Nowaka spełnia wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Artur Tyliszczak