

Recenzja rozprawy doktorskiej pt. „Numerical study on early age thermal-shrinkage stresses in massive foundation slabs” autorstwa mgr inż. Anety Żmij

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport dr hab. inż. Grzegorza Wojnara, profesora Politechniki Śląskiej (L.dz. RDIT/72/2019/2020) z dnia 24.04.2020 informujące o uchwale Rady Dyscyplin powierzającej mi obowiązki recenzenta i opracowanie opinii rozprawy doktorskiej jak to sformułowano powyżej. Rozprawa jest przedstawiona w języku angielskim, jednakże poinformowano mnie, że recenzja powinna być opracowana w języku polskim.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiot recenzji stanowi opracowanie pt. „Numerical study on early age thermal-shrinkage stresses in massive foundation slabs” autorstwa mgr inż. Anety Żmij, przedstawione Radzie Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej jako rozprawa doktorska. Promotorami pracy – według informacji na stronie tytułowej rozprawy – są prof. dr hab. inż. Barbara Klemczak z Politechniki Śląskiej i jako kopromotor dr inż. Miguel Azenha z University of Minho, Portugalia. Rozprawa liczy 149 stron maszynopisu, w tym 119 rysunków i 31 tablic. Do właściwej rozprawy dołączono dwa załączniki: A1 – “Prediction models for the development of mechanical properties; Creep prediction models” (9 stron) oraz A2 – “Analytical methods” (15 stron), które odpowiednio przywołano w tekście właściwym. W rozprawie przytoczono 217 pozycji literatury, w tym trzy publikacje autorstwa lub

Recenzja spełnia wymogi formalne
Przewodniczący Rady Dyscypliny
Inżynieria Lądowa i Transport

dr hab. inż. Grzegorz Wojnar, prof. PŚ

współautorstwa Doktorantki. Z satysfakcją należy odnotować, że dwie z nich zostały opublikowane w wysoce renomowanych czasopismach: *American Concrete Institute Structural Journal* (2020) i *Construction and Building Materials* (2019), trzecia publikacja była zaprezentowana na konferencji (Kraków, 2018). W wykazie literatury przytoczono również 21 pozycji autorstwa promotora pracy prof. Barbary Klemczak. Dane te wymownie świadczą o tym, że rozprawa została przygotowana w szkole naukowej, która ma w tej problematyce już ugruntowaną pozycję, a Autorka zaczęła w tym dziele aktywnie współuczestniczyć. W monografii zamieszczono podziękowania zarówno instytucjonalne, jak i osobiste. Z podziękowań tych wynika, że do powstania dzieła przyczyniła się misja naukowa w Uniwersytecie w Minho zrealizowana w ramach European Cooperation of Science and Technology, COST TU-1404 „Towards the next generation of standards for services life of cement-based materials and structure”, któremu to komitetowi przewodniczy dr inż. Miguel Azenha, kopromotor w przewodzie doktorskim. Misja ta umożliwiła również dostęp do profesjonalnego oprogramowania DIANA FEA. Podziękowania są również kierowane do dra Dirka Schlicke z Uniwersytetu Technologicznego w Grazu (Austria), który udostępnił wyniki pomiarów płyty fundamentowej śluzy Sulfeld-Süd, które umożliwiły „a feasible conduction of numerical analysis”. W podziękowaniu podkreślono, że prace badawcze były finansowane z grantów badawczych Politechniki Śląskiej i portugalskiej fundacji FCT.

Ponadto wraz z oryginałem rozprawy zostało udostępnione obszernie (50 stron) omówienie rozprawy w języku polskim. Wszystkie uwagi zawarte w niniejszej recenzji odnoszą się jednakże do wersji angielskiej.

3. Ocena celowości podjęcia tematu oraz trafności sformułowania problemu naukowego i tez badawczych

Tytuł dobrze oddaje treść rozprawy, akcentując znaczenie narzędzia naukowego *analiza numeryczna*, definiując zjawisko *wczesne naprężenia termiczno-skurczowe* i adresując rozwiązania do inżyniersko szczególnie trudnych obiektów *masywnych płyt fundamentowych*.

Dla zobrazowania jaki postęp w zakresie narzędzia naukowego reprezentuje rozprawa przytaczam, że opublikowana w ubiegłym dziesięcioleciu (2003) monografia prof. W. Kiernożyckiego „Betonowe konstrukcje masywne” przedstawiająca ówczesny stan wiedzy i techniki nawet nie wspomina o *analizie* czy też *metodzie numerycznej*.

Wśród cytowanych w rozprawie 217 referencji ponad 85% zostało opublikowanych w ciągu ostatnich 20 lat, tzn. w XXI wieku. Również to stanowi potwierdzenie aktualności tematu. W

moim odczuciu praca jest przykładem otwarcia nowej fali technologicznego rozwoju: po technologii układów scalonych (1950), biotechnologii (1970), nanotechnologii (1990) i współcześnie *technologii cyfrowej* (2015) w odniesieniu do technologii w ogóle i technologii betonu cyfrowego w szczególności.

Uzasadnienie podjęcia problemu zostało przedstawione w sposób przekonywujący i wyczerpujący w rozdz. 3.1 „Justification for the research”. Jako cel nadrzędny pracy Autorka określa wkład w zrozumienie procesu modelowania MFS w odniesieniu do przebiegu zjawisk cieplno-skurczowych w płytach masywnych. Jest to sformułowanie ogólne, a jednocześnie bardzo ambitne. Zostało ono następnie bardziej sprecyzowane (str. 64 i 65) przez dwa cele szczegółowe:

- analiza wpływu poziomu danych wejściowych modelu MES na uzyskane wyniki,
- określenie wpływu wybranych czynników materiałowo-technologicznych na rozkład temperatury i naprężeń podczas wiązania i twardnienia w masywnych płytach fundamentowych.

W tym kontekście chciałbym zwrócić uwagę na zdania poprzedzające te sformułowania (str. 63): modele symulacyjne FE są jedynie przybliżeniem przebiegu rzeczywistych procesów w rzeczywistych konstrukcjach. W konsekwencji występuje ryzyko zbyt uproszczonego modelu bądź w wyniku pominięcia niektórych czynników, bądź niedokładności wartości zmiennych. Uważam, że w tych rozważaniach Autorka zawarła podstawowy dylemat w inżynierii materiałów budowlanych dotyczący równowagi: dokładność – prostota. Jak zmniejszyć złożoność, dostęp do wiedzy uczynić łatwiejszym, a wnioskowi nadać praktyczną przydatność. To właśnie wydobycie istoty zjawiska z gąszczy oddziaływań różnych czynników i wykazanie jego istotności stanowi w mojej opinii podstawowe wyzwanie naukowe rozprawy. Należy przy tym podkreślić, że przedmiotem rozważań jest obiekt złożony, makroniejednorodny i wielofazowy – zmienny w czasie, a sam proces jest wieloczynnikowy. W tym kontekście Autorka ma rację zauważając, że w wyniku tej pracy można oczekiwać zmniejszenia liczby kosztownych i pracochłonnych badań laboratoryjnych.

W świetle przedstawionych rozważań (dopiero na str. 64 i 65) zostają postawione przez Autorkę dwie tezy badawcze:

- można dokonać uproszczeń niektórych założeń i danych wejściowych modelu MES przy analizach wczesnych wpływów termiczno-skurczowych w masywnych płytach fundamentowych, bez obniżenia jakości i poprawności uzyskanych wyników;

- analiza MES może stanowić przydatne narzędzie w procesie projektowania odpowiedniego składu mieszanki betonowej oraz doboru technologii betonowania masywnych płyt fundamentowych, a także może wskazać czynniki o kluczowym znaczeniu.

Pierwsza z tych tez odpowiada ambicjom związanym z rozprawą doktorską. Natomiast druga teza robi wrażenie zbyt oczywistej; czy w świetle przedstawionego uprzednio stanu wiedzy i techniki można było mieć wątpliwość, że FE analiza może być „useful tool for”? Zwłaszcza, że Autorka sama osłabia te wątpliwości, pisząc (str. 70 i 71) między innymi:

- “computational analysis **has become crucial in the simulation of phenomena** occurring in early-age concrete;
- The **main advantage of the FE models is the possibility to obtain a more accurate reflection of real conditions**” (podkreślenia recenzenta).

Niemniej stwierdzam, że w rozprawie został sformułowany problem naukowy, który będzie wymagał oryginalnego rozwiązania.

4. Ocena poprawności wnioskowania naukowego

Opracowanie trafnie rozpoczyna się od ideowego opisu obiektu badań – masywnych podpór fundamentowych (rodz. 1.). Przedstawiono wnikliwą analizę uwarunkowań przebiegu procesu wiązania i twardnienia w odniesieniu do rozkładu temperatury i naprężeń. W następnym rozdziale przedstawiono 10 przykładowych obiektów – masywnych podpór fundamentowych; głównie z Polski, ale także z Chin i Litwy, krótko opisując przebieg ich realizacji w latach 2002 (elektrownia Pątnów) – 2019 (elektrownia Opole), ze szczególnym zaznaczeniem jakie działania podejmowano i z jakim skutkiem, aby zapobiec zarysowaniu obiektu. Uważam, że to doskonale zestawienie, które nadaje wymiar inżynierii poprzednim rozważaniom, a zarazem stanowi syntetyczny stan odniesienia dla wyników obliczeń przedstawionych w rozdz. 5.

Rozważania przedstawione w rozdz. 1. , w połączeniu z wprowadzeniem do modelowania zawartym w rozdz. 4.1, uważam za bardzo istotną jeśli nie najistotniejszą część pracy. Autorka ukazała złożoność zjawiska kształtowania się pól naprężeń cieplno- (w rozprawie „thermal”) wilgotnościowo-skurczowym, uchwyciła przy tym skomplikowanie procesu faktem, że w miarę upływu czasu - postępu wiązania i twardnienia zmieniają się wartości cech fizycznych. Dokonano umiejętnej fragmentaryzacji procesu ogólnego na modele cząstkowe. O stopniu zawikłania przedmiotu rozważań, a zarazem umiejętności mgr inż. Anety Żmij strukturyzacji

zagadnienia i nadawania jej właściwej architektury świadczą schematy blokowe (rys. 4.9 – 4.11) przyporządkowane odpowiednio: *total strain based crack model*, *multi-directional fixed crack* i *linear elastic isotropic model*; każdy z nich liczący odpowiednio od kilkunastu do blisko 40 bloków. W tej części rozprawy zostały nakreślone podstawy fizyczne przyszłych obliczeń, a zarazem odczarowano „czarną skrzynkę” zastosowanego oprogramowania FEA.

To właśnie w ten sposób oraz przez formułowanie założeń (rozdz. 4.2.2) do przeprowadzenia obliczeń według wybranego programu Autorka ukazuje istotę naukową swoich studiów i realizuje nadrzędny cel *pracy wkład w zrozumienie modelowania MES zjawisk cieplno-skurczowych w płytach masywnych*. Po przedstawieniu (rozdz. 4.2.1) zbioru wybranych programów FEA Autorka do swoich obliczeń wybiera program DIANA FEA BV – opracowany przez TNO, Delft, Holandia. Można się dopatrzeć, że głównymi kryteriami wyboru były dostępność oraz stosowanie w podobnych obliczeniach, w tym przez kopromotora rozprawy M. Azenhję. Oczywiście można uznać, że te przesłanki są wręcz rozstrzygające (egzystencjalne dla realizacji pracy). W pracy naukowej można było jednakże oczekiwać analizy porównawczej, SWOT lub podobnej, wszak decyzja dotyczy tytułowego (!) narzędzia badawczego.

Okolicznością szczególną omawianego studium jest fakt, że odniesienie referencyjne do przeprowadzonych obliczeń stanowi – niezależnie od syntetycznego stanu referencji dla zbioru 10 obiektów przedstawionych w rozdz. 2. – obiekt Sülfeld-Süd (Niemcy), którego betonowanie przeprowadzono w latach 2005-2008 (str. 83). Powoduje to szereg konsekwencji. Z jednej strony zapewnia rzetelność weryfikacji: obiekt powstał i od kilkunastu lat jest użytkowany. Z drugiej strony odbieramy obliczeniom walor prognostyczny modelowania, ale tym bardziej w sposób stanowiący można się wypowiadać o przydatności narzędzia naukowego. W tej sytuacji nie jest możliwe zdublowanie pomiaru bądź powtórzenie w kolejnej warstwie betonowania. W konsekwencji zdarza się, że w wyniku złożonego rozumowania (str. 94) wykazano, że *the measurements were affected by the local failure that occurred within the construction stage*. W innym miejscu zaś mamy stwierdzenie: *The observation of both monitoring and FEA results allowed for the conclusion that the measurements from sensors after that time cannot be taken as a reliable benchmark, as the operation of the sensors was likely to be disrupted*. Jest to godne zastanowienia (a także podziwu) odwrócenie sytuacji walidacyjnej, to nie pomiar koryguje wynik obliczeń, lecz odwrotnie – wynik obliczeń wnioskuje o błędzie pomiaru. W pracy znajdujemy stwierdzenia (rozdz. 5.3), że *in general, the observed very good coherence between measured and calculated temperatures allows considering the obtained results of the*

FEA simulation as successful (np. str. 94). Należy się z tym zgodzić. Nie sposób jednakże nie zauważyć, że żadnej miary tej koherencji nie zastosowano.

W niektórych stwierdzeniach Autorka wydaje się być zbyt optymistyczna i miejscami trudno ten optymizm podzielić. Zwłaszcza, że już na następnej stronie (str. 95) Autorka przyznaje, że *the quality of coherence of monitored and calculated stresses is quite satisfactory only regarding the first period of analysis* oraz że *similar doubts concern strains*.

Za szczególnie cenne zarówno poznawczo, jak i w kontekście metodyki – formułowanie zasad postępowania badawczego - uważam rozdz. 5.4, który jak to trafnie określiła Autorka (str. 100) jest poświęcony *basic strategies for thermo-mechanical FE modelling of foundation slabs*. Wysoka ocena jest podyktowana zarówno wartością wskazań metodycznych, którymi Autorka się dzieli na podstawie uzyskanego doświadczenia, ale również wnikliwością cechującą rozważania (np. tab. 5.20 i 5.21) oraz umiejętnością kategoryzacji wydarzeń i ich sekwencyjnego rozważania.

5. Ocena redakcji naukowej

Rozprawa pod względem redakcji naukowej jest bardzo starannie opracowana. Zwraca uwagę dbałość o poprawność definicji i staranność doboru oznaczeń; spis symboli zajmuje siedem (!) stron. Do deficytów należy zaliczyć brak tytułu i streszczenia w języku polskim. Fakt, że istnieje – jako odrębny dokument – obszernie polskie omówienie dzieła, nie zmienia ostrości tej uwagi. Praca jest ładnie napisana, przez co chcę wyrazić, że czyta się z zainteresowaniem. Czytelnik już przy starannym rozróżnieniu (str. 64, 65) *aim* i *scope* odczuwa satysfakcję. Z tym, że *aim* zaczyna się mocnym stwierdzeniem krytycznym odnośnie do zastanego stanu wiedzy i właściwe byłoby odwołanie się do referencji.

Przedstawiony zbiór literatury w kontekście podjętego zadania badawczego uważam za właściwy i wystarczający. Niemniej w dążeniu do doskonałości tej rozprawy, to:

- Uzupełnił bym zbiór o dwie publikacje polskich uczonych: prof. Kazimierza Flagi i prof. Dariusza Gawina, opublikowane w 2013 roku w Biuletynie Polskiej Akademii Nauk;
- Referencje dotyczące temperatury gruntu (str. 90) uzupełnił bym publikacją bardziej współczesną (2017) i odnoszącą się do ziem polskich: J.A. Żurański, T. Godlewski: *O przemarzaniu gruntów w Polsce*, ITB, 2017;

- Trzykrotne odwołanie się do zasady Arrheniusa uzupełniłbym przypisem: W. Kurdowski, P. Pichniarczyk: Problems with the Arrhenius equation in the evaluation of concrete maturity. *Cement Wapno Beton*, 3, 2016, s. 149-156 (w podobnej sytuacji „Funkcja temperatury tężącego betonu i jej zastosowania do analizy procesu dojrzewania betonu” prof. Flaga odwoływał się do reguły Vant Hoffa).

Detaliczność tych uwag jedynie potwierdza staranność edytorską i upoważnia do wysokiej oceny również pod tym względem.

6. Ocena trafności sformułowania wniosków

Przedstawione w rozdz. 6. rozprawy wnioski zostały poprzedzone ogólnym podsumowaniem pracy. Należy się zgodzić z Autorką, że modelowanie wiązania i twardnienia betonu – co zresztą już podkreślałem w niniejszej recenzji – stanowi jeden z najtrudniejszych przypadków w inżynierii materiałów budowlanych. W tym kontekście wniosek generalny wystawia Autorce znamienite świadectwo i ja się z nim zgadzam. Rzadko tylko można o swoim osiągnięciu powiedzieć *result in very complex simulation models that successively get closer to reality* (str. 146).

W rozprawie pokazano jak narzędzie naukowe może otwierać nowe perspektywy badawcze, jak wyniki należy właściwie interpretować i jakie możliwości i ograniczenia warunkują poprawność wnioskowania.

Oprócz „General conclusions” zostały przedstawione także trzy zbiory wniosków szczegółowych, zatytułowane jak następuje:

- “Some detailed technical conclusions regarding DIANA software”,
- “Detailed conclusions concerning the methodology of modelling”,
- “Detailed conclusions concerning the influence of the chosen technology-material factors”.

Spośród tych wniosków szczegółowych podnoszę – z przekonaniem – stwierdzenie dowiedzenia obu tez rozprawy zawarte w drugiej i trzeciej grupie wniosków. Pozostałe stwierdzenia uważam za zbyt rozwinięte – przegadane i w pewnym stopniu powtórzenia uprzednio przedstawionych dociekań. Uwagi zawarte w pierwszej grupie wniosków „conclusions regarding DIANA software” robią wrażenie nadmiernej – jak na pracę naukową – aprecjacji produktu handlowego, „over commercialized”.

7. Wniosek końcowy

Zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 roku rozprawa doktorska powinna stanowić *oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata, a także umiejętność prowadzenia pracy naukowej* – stwierdzam, że wszystkie te warunki w odniesieniu do rozprawy mgr inż. Anety Żmij zostały spełnione w stopniu więcej niż zadowalającym.

Wniosuję o wyróżnienie rozprawy mgr inż. Anety Żmij za opracowanie usystematyzowanej metodyki „oswajania” narzędzia naukowego na przykładzie analizy numerycznej w zastosowaniu do modelowania naprężeń termiczno-skurczowych w masywnych płytach fundamentowych

