

Łódź, 6 grudnia 2022 roku.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Marcina Kaczmarzyka
„Modelowanie energetyczne mieszkalnych obiektów budowlanych lokalizowanych
na powierzchni Księżyca”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej z dnia 13 lipca 2022 r. oraz pismo Przewodniczącego Rady – Pana prof. dra hab. inż. Tomasza Siwowskiego - z dnia 22 sierpnia 2022 r., a także ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. 2018 poz. 1668) z późniejszymi zmianami (tekst jednolity z dnia 3 marca 2022 r. - Dz.U. 2022 poz. 574).

2. Przedmiot oceny

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska „*Modelowanie energetyczne mieszkalnych obiektów budowlanych lokalizowanych na powierzchni Księżyca*”, opracowana przez mgra inż. Marcina Kaczmarzyka z Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Lech Lichołai z Politechniki Rzeszowskiej, a promotorem pomocniczym dr inż. Aleksander Starakiewicz, prof. PRz. Praca ma charakter teoretyczno-obliczeniowy, liczy 275 stron, podzielonych na 8 rozdziałów, w tym wstęp – rozdz. 1, spis „obiektów” (rysunków, tabel i wzorów) – rozdz. 7 i spis literatury – rozdz. 8. Dysertacja zawiera 160 rysunków, 74 tablice, 49 wzorów oraz 511 pozycji literaturowych, głównie angielskojęzycznych (w tym 13 prac Doktoranta i 2 - promotorów doktoratu).

3. Ogólna ocena rozprawy, ocena trafności doboru jej tematu i tytułu, sformułowania tez, jej układu i doboru źródeł

Recenzowana praca dotyczy bardzo nietypowej, jak na klasyczną fizykę budowli, tematyki modelowania wymiany ciepła i bilansu energetycznego mieszkalnych budowli zlokalizowanych na powierzchni Księżyca, gdzie panują bardzo odmienne warunki środowiskowe od występujących na Ziemi. Dysertacja jest bardzo obszerna, przy czym zawiera ona wiele informacji i danych dotyczących Księżyca, m.in. historii jego eksploracji przez ludzi, budowy i ukształtowania jego powierzchni, warunków środowiskowych na tym naturalnym satelicie Ziemi, opisu orbity Księżyca w ruchu względem Ziemi i Słońca, planowanych wypraw, budowy stałych baz na powierzchni Księżyca oraz ich potencjalnego wyposażenia. W całej pracy widoczna jest pasja i głęboka wiedza Doktoranta dotycząca tych zagadnień. Biorąc pod uwagę bardzo odmienny od warunków ziemskich charakter wymiany ciepła budowli księżycowych z otoczeniem, wynikający z braku atmosfery, znacznej długości „dnia księżycowego”, braku pór roku oraz inaczej zmieniającego się kierunku i natężenia promieniowania słonecznego na powierzchni Księżyca niż na Ziemi, a także nietypowych właściwości termicznych jego gruntu (regolitu), sformułowanie modelu matematycznego i numerycznego wymiany ciepła, a także przeprowadzenie szeregu analiz parametrycznych dla przyjętych kształtów i rozmiarów hipotetycznego obiektu mieszkalnego zlokalizowanego na powierzchni Księżyca, na różnych szerokościach

selenograficznych, uważam za trudny, ciekawy i wymagający szerokiej wiedzy z zakresu fizyki wymiany ciepła, metod numerycznych i selenografii, problem naukowy. W mojej ocenie tematyka i zakres pracy mieści się w obszarze naukowym szeroko rozumianej fizyki budowli, będącej częścią dyscypliny inżynieria lądowa i transport (wg najnowszego rozporządzenia MNiE – inżynieria lądowa, geodezja i transport).

Jako że selenografia i kosmonautyka nie wchodzi w zakres moich zainteresowań i badań naukowych, dysertacja mgra M. Kaczmarzyka została oceniona z punktu widzenia fizyki budowli i metod numerycznych w niej stosowanych, oraz poprawności przyjętej metodyki badań naukowych, co mieści się w zakresie moich kompetencji i wiedzy.

W mojej ocenie tytuł pracy doktorskiej mgra M. Kaczmarzyka dobrze odpowiada jej zawartości merytorycznej, choć moim zdaniem lepiej byłoby użyć określenia „modelowanie wymiany ciepła” zamiast „modelowanie energetyczne”, aby bardziej podkreślić ten aspekt pracy, wchodzący bezpośrednio w zakres klasycznej fizyki budowli.

W rozdziale 1.2 Doktorant sformułował tezę brzmiącą: „*Istnieje możliwość efektywnego wykorzystania energii promieniowania słonecznego do celów zapewnienia samowystarczalności energetycznej mieszkalnym obiektom budowlanym funkcjonującym w warunkach środowiska księżycowego*”, którą zinterpretował szczegółowo w rozdziale 1.3. W kolejnym rozdziale 1.4 podał cel pracy, który sformułował jako „*określenie wpływu wybranych czynników środowiskowych oraz rozwiązań technicznych i architektoniczno-budowlanych, jakie mogą zostać wykorzystane w mieszkalnych obiektach budowlanych na Księżycu, na całkowite zapotrzebowanie energetyczne tych obiektów oraz na całkowitą masę systemów zasilania o określonych konfiguracjach*”. Zarówno tezę pracy, jak i jej cel uważam za sformułowane poprawnie, a jej treść merytoryczna jest właściwie do nich dobrana, wykazując słuszność tezy i realizując przyjęty cel dysertacji.

Kolejność i układ rozdziałów rozprawy są logiczne i dostosowane do jej teoretyczno-obliczeniowego charakteru, choć moim zdaniem praca jest stanowczo zbyt długa. Na około 30 stronach podano szereg informacji z zakresu historii kosmonautyki (ciekawych, ale o charakterze popularno-naukowym) oraz krótko, w encyklopedyczny sposób, podsumowano zagadnienia dobrze opisane w literaturze, np. pojęcie energii w fizyce i budownictwie, mechanizmy wymiany ciepła, modelowanie energetyczne budynków, metody numeryczne rozwiązywania zagadnień wymiany ciepła, weryfikację i walidację w modelowaniu, które moim zdaniem wystarczyłoby krótko podsumować stosownymi przywołaniami pozycji literaturowych. Moim zdaniem, można byłoby też pominąć fragment pracy opisujący 1-wymiarowe obliczenia rozkładu temperatury w regolicie (gruncie księżycowym) metodą MRS (rozd. 3.4.2 i 3.4.3), w których wystąpiły problemy ze stabilnością rozwiązania, czego można było się spodziewać, bo zastosowano schemat jawny dyskretyzacji czasu, a ponadto ich wyniki nie zostały wykorzystane w dalszej części pracy. Można było też pominąć fragment pokazujący 2-wymiarowe obliczenia metodą MES rozkładu temperatury w podłodze na gruncie (rozd. 3.5.2), gdzie na powierzchni gruntu przyjęto nierealistyczne warunki brzegowe (bez uwzględnienia grubości ściany budynku rozdzielającej powierzchni we wnętrzu budynku od zewnętrznego gruntu), co musiało spowodować znaczące oscylacje wyników obliczeń temperatury na styku tak bardzo różniących się warunków brzegowych.

Praca zawiera bardzo bogaty spis literatury cytowanej przez Doktoranta, obejmujący 511 pozycji (w tym 11 prac Doktoranta i Jego 2 prace magisterskie (na kierunkach Budownictwo z 2013 r. i Fizyka z 2018 r.). Wykaz ten jest wyczerpujący i na ogół trafnie dobrany, choć moim zdaniem można byłoby w nim pominąć część pozycji z zakresu historii kosmonautyki i ograniczyć do najważniejszych pozycji wykaz prac opisujących stan wiedzy z zakresu metod numerycznych, teorii wymiany ciepła czy modelowania energetycznego.

Podsumowując stwierdzam, że tytuł rozprawy odpowiada jej treści, zaś tematyka pracy stanowi aktualny i potencjalnie ważny problem badawczy fizyki budowli (księżycowych), zwłaszcza w kontekście plano-

wanej w najbliższych latach intensywnej eksploracji Księżyca. Być może Doktorant inicjuje rozwój nowego obszaru badań, który można roboczo nazwać fizyką budowli księżycowych....

4. Charakterystyka treści rozprawy i jej ocena merytoryczna

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów merytorycznych (rozd. 1-6), spisu ważniejszych oznaczeń (na początku pracy), wykazu rysunków, tabel i wzorów (rozd. 7), streszczenia polskiego i angielskiego (na końcu pracy), oraz spisu literatury (rozd. 8), obejmującego 511 pozycji uporządkowanych w kolejności cytowania.

Rozdział pierwszy zawiera krótkie wprowadzenie i uzasadnienie tematyki podjętych w rozprawie badań, w tym historię i przyczyny eksploracji Księżyca przez ludzi. Rozdział ten kończy się sformułowaniem i szczegółowym wyjaśnieniem tezy dysertacji oraz podaniem celu i zakresu pracy.

Moim zdaniem, w tej części pracy brakuje klasycznego przeglądu stanu wiedzy z zakresu modelowania wymiany ciepła budowli księżycowych (o ile były już publikowane, co należałoby wyraźnie stwierdzić), z którego wynikałoby jasno celowość podjęcia takich badań oraz ich kierunek i zakres.

W rozdziale drugim, zatytułowanym „*Przegląd literatury przedmiotu*”, krótko opisano obecny stan wiedzy w obszarach bezpośrednio związanych z przedmiotem tej rozprawy doktorskiej. Opisano formy energii, efekty przemian energetycznych i mechanizmy wymiany ciepła, a także zagadnienia związane z zapotrzebowaniem na energię w budownictwie oraz ludzkim metabolizmem jako istotnym wewnętrznym źródłem ciepła w budynkach mieszkalnych. Omówiono też promieniowanie słoneczne jako najważniejsze źródło energii na Ziemi i Księżycu oraz modelowanie energetyczne w budownictwie i stosowane w pracy metody numeryczne. Ponadto szczegółowo opisano warunki fizyczne panujące na powierzchni Księżyca, co było podstawą teoretyczną do właściwego modelowania obiektów budowlanych w tym odmiennym od ziemskiego środowisku. W dwóch ostatnich podrozdziałach - 2.10 „Fizyka budowli księżycowych” i 2.11 „Mieszkalne obiekty budowlane na Księżycu” - omówiono podstawy wymiany ciepła w środowisku powierzchni księżycowej oraz techniczne i architektoniczne aspekty funkcjonowania takich konstrukcji, w świetle sprawdzonych rozwiązań technicznych, jak i współcześnie wysuwanych koncepcji. Moim zdaniem, ten rozdział jest stanowczo za obszerny, zwłaszcza podrozdziały 2.2 – 2.8 o charakterze encyklopedycznym, jak to już zostało wskazane w punkcie 3 recenzji.

W trzecim, najważniejszym merytorycznie rozdziale pracy, Doktorant przedstawił kolejne etapy budowy autorskiego modelu matematycznego i numerycznego (w module *Thermal PDE* środowiska *MatLab*) wymiany ciepła mieszkalnej budowli funkcjonującej na powierzchni Księżyca. Model był formułowany od podstaw, najpierw Doktorant opracował przybliżony model astrometryczny do wyznaczania pozycji Słońca na księżycowym niebie, który następnie pozytywnie zweryfikował przez porównanie z dokładnymi obliczeniami astrometrycznymi. Potem modelował wymianę ciepła budowli na powierzchni Księżyca, stopniowo rozbudowując geometrię modelu: od 1-wymiarowej (pole temperatury w gruncie i przegrodach budowlanych 1D), poprzez 2-wymiarową (w podłodze/ścianie zagłębionej w gruncie), a zakończył pełną analizą 3-wymiarowych budowli o kształcie walca i kopuły, posadowionych w księżycowym regolicie, w celu wyznaczenia bilansu cieplnego tych budowli. Modelowano złożoną, radiacyjną i konduktywną wymianę ciepła między księżycowym budynkiem mieszkalnym a jego otoczeniem gruntowym i przestrzenią kosmiczną. Na podstawie danych literaturowych oszacowano zapotrzebowanie energetyczne do zasilania nieodzownych systemów technicznych budynków księżycowych oraz ich dodatkowego wyposażenia. Uwzględniono ciepło metaboliczne oraz inne bytowe źródła ciepła, aby określić całkowite wewnętrzne obciążenie cieplne w analizowanych obiektach mieszkalnych. W celu zapewnienia dostatecznego poziomu ochrony termicznej, radiologicznej oraz balistycznej budynku, założono wykonanie jego zewnętrznej obudowy z warstwy nieskonsolidowanego księżycowego regolitu o grubości 100 cm. Dążono do redukcji kosztu obliczeniowego (czasu i

wymogów sprzętowych) przez minimalizację przestrzennego zasięgu modelowanego otoczenia budynku oraz do określenia najbardziej korzystnych pod tym względem warunków początkowych obliczeń.

Model matematyczny 3D sformułowany i rozwiązany numerycznie przez Doktoranta jest moim zdaniem merytorycznie poprawny, natomiast mam zastrzeżenia do modeli 1D i 2D, podane poniżej.

Moim zdaniem, obliczenia 1-D pola temperatury w regolicie, wyznaczonego za pomocą metody MRS, nie zostały zwalidowane (jak napisał Doktorant), bo nie porównano ich bezpośrednio z wynikami pomiarów „in situ”, tak więc opis tego modelu, który dodatkowo powodował bardzo duże problemy numeryczne (np. Rys. 3.4.6), można było pominąć w pracy (nie wszystkie próby analiz/obliczeń trzeba zamieszczać w rozprawie). Ponadto fizycy chętnie stosują schemat jawny metody MRS, która jest bardziej intuicyjna niż MES, ale może powodować problemy ze zbieżnością rozwiązania. W naukach inżynierskich częściej korzysta się z MES do dyskretyzacji przestrzennej, a do dyskretyzacji w domenie czasu stosuje się MRS, ale schemat w pełni niejawni lub Cranka – Nicholsona, które są w bezwzględnie stabilne, choć mają wyższy koszt obliczeniowy niż schemat jawny. Zamieszczone w pracy i pokazane m.in. w Tab. 3.4.1, rozwiązania oraz uwagi o wpływie gęstości siatki i długości kroku czasowego są oczywiste, opisano je w podręcznikach metod MES i MRS, więc nie było potrzeby ich powtarzania w pracy doktorskiej. „Czas przeprowadzenia obliczeń” jest określany w literaturze jako „koszt obliczeniowy” i taki termin proponowałbym stosować w przyszłych publikacjach Doktoranta.

W podrozdziale 3.5.2.2 Doktorant pisze o „efekcie karbu” – jest to ewidentnie efekt czysto numeryczny, wynikający z bezpośredniego stykania się brzegów obszaru obliczeniowego z bardzo odmiennymi warunkami brzegowymi, co nieuchronnie musiało spowodować oscylacje rozwiązania w tym obszarze (zagęszczanie siatki MES i krótszy krok czasowy niewiele zmieniają, co widać w Tab.3.5.2). Dlaczego nie uwzględniono, choćby w uproszczony sposób, obecności ściany, która rozdziela powierzchnie gruntu i podłogi, na których występują tak bardzo odmiennie warunki brzegowe (np. modelując fragment ściany o zbliżonym do rzeczywistego oporze cieplnym lub grubości)? Moim zdaniem pozwoliłoby to uniknąć stwierdzonych problemów ze zbieżnością rozwiązania. Ponadto, moim zdaniem, nie należało w ogóle zamieszczać w pracy tych rozważań, ani pisać o „efekcie karbu”, bo jest to ewidentnie skutek niewłaściwie przyjętych warunków brzegowych, a nie zjawisko natury fizycznej. Nie ma zwyczaju pokazywania w publikacjach wyników wszystkich, w tym „nieudanych” symulacji - co najwyżej pokazuje się wyniki poprawne, ewentualnie opisuje problemy, jakie wystąpiły, wraz z podaniem metody ich uniknięcia.

Chciałbym też odnieść się to stwierdzenia na str. 133 *"Jeżeli cel symulacji nie skupia się na warunkach termicznych panujących w regolicie, lecz na kwantyfikacji wymiany ciepła między budynkiem a jego otoczeniem, to istnieje możliwość znacznego ograniczenia obszaru modelowanego regolitu."* Moim zdaniem jest dokładnie na odwrót - jeśli interesuje nas rozkład temperatury (z założoną dokładnością, np. 0.1 K), to obszar, który trzeba modelować może mniejszy niż dla przypadku, gdy analizujemy strumienie ciepła w celu określenia całkowitych strat ciepła - patrz np. Rys. 4a i 4b w normie PN-EN ISO 10211-2 *"Mostki cieplne w budynkach. Obliczanie strumieni cieplnych i temperatury powierzchni Część 2: Liniowe mostki cieplne"*.

W rozdz. 3.9 podsumowującym wyniki rozdziału 3 Doktorant napisał: *„Porównując wyniki uzyskane tu z przeprowadzonych 75 symulacji z dostępnymi pomiarami in situ, ..."*, ale nie porównano bezpośrednio wyników pomiarów "in situ" z wynikami symulacji opracowanym modelem wymiany ciepła. Wykonanie takiego porównania podniosłoby wartość pracy, bo przedstawione analizy potwierdzają jakościowo i pod względem opisu fizycznego poprawność modelu matematycznego - brak jednak porównania ilościowego.

Rozdział czwarty poświęcono przedstawieniu metody obliczeń całkowitej masy różnych konfiguracji systemów zasilania obiektów budowlanych lokalizowanych na Księżycu. Podano parametry i założenia analizy systemów energetycznych mieszkalnych budynków księżycowych o bryłach cylindrycznych i kulistych, dla których zmieniano: architekturę systemu zasilania, przyjętą strategię dobowej regulacji zapotrzebowa-

nia budynku na moc elektryczną, lokalizację budynku (szerokość selenograficzną), typ montażu paneli PV oraz względne usłonecznienie lokalizacji budynku. Założenie, że zrezygnowano z modelowania powłoki szczelnej celem uproszczenia geometrii układu i ograniczenia liczby węzłów, jest moim zdaniem słuszne. Mam jednak wątpliwość dotyczącą wyznaczania mocy źródeł energii elektrycznej. Czy rzeczywiście moc ta powinna być dobierana na podstawie średnich wartości mocy, a nie według maksymalnej możliwej mocy urządzeń, które mogą/muszą pracować równocześnie, zwłaszcza w sytuacjach awaryjnych. Prosiłbym Doktoranta o komentarz na ten temat podczas publicznej obrony.

Wyniki symulacji dla ww. 74 wariantów obiektów księżycowych posłużyły do przeprowadzenia wieloaspektowej analizy porównawczej wpływu różnych czynników środowiskowych i parametrów technicznych budynku na: masę całkowitą różnych konfiguracji systemów zasilania, która ma kluczowe znaczenie przy budowie stałych baz na powierzchni Księżyca. Szczególny nacisk położono na przeanalizowanie szerokiego spektrum warunków oświetleniowych oraz różnych strategii zarządzania mocą. Wyznaczono całkowitą masę różnych systemów zasilania obiektów budowlanych na powierzchni Księżyca, funkcjonujących w różnych warunkach środowiskowych.

Rozdział piąty zawiera analizy parametryczne zapotrzebowania energii elektrycznej oraz masy ich systemów wytwarzających i magazynujących energię w księżycowych budowlach mieszkalnych. Określone na podstawie symulacji energetycznych wg modelu 3D (omówionego w rozdziale 3 pracy), dla 74 wariantów budowli księżycowych (opisanych w rozdziale 4), całkowite zapotrzebowanie energetyczne budynku pozwoliło na wyznaczenie najważniejszych parametrów, w tym całkowitej masy (kluczowej dla obiektów wznoszonych na Księżycu), dla trzech głównych typów systemów energetycznych: jądrowych, fotowoltaicznych oraz hybrydowych, z których każdy wykorzystywał jeden z trzech alternatywnych magazynów energii elektrycznej. Analiza tych wyników dla przyjętych 74 kombinacji: kształtu bryły budynku, jego lokalizacji, względnego usłonecznienia, typu montażu paneli PV oraz strategii dobowego zarządzania zapotrzebowaniem budynku na moc elektryczną pozwoliła na wskazanie najkorzystniejszych wariantów. Wykazano, że zastosowanie odpowiedniej strategii kontroli zapotrzebowania budynku na moc elektryczną stwarza możliwość efektywnego wykorzystania energii promieniowania słonecznego celem zapewnienia niezależności energetycznej budynkom lokalizowanym na powierzchni Księżyca, a tym samym wykazano słuszność tezy rozprawy doktorskiej o możliwości zapewnienia samowystarczalności energetycznej mieszkalnych obiektów budowlanych lokalizowanych na powierzchni Księżyca.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie najważniejszych wniosków i wyników rozprawy doktorskiej, a także przedstawiono w nim propozycje przyszłych badań. Wykazano między innymi, że odznaczające się wysoką mocą właściwą panele PV mają, przy odpowiednim wykorzystaniu, umożliwiają znaczne zmniejszenie masy systemów energetycznych poprzez ograniczanie wykorzystania stosunkowo ciężkich reaktorów jądrowych oraz magazynów energii elektrycznej. Wskazano także na możliwości dalszego wykorzystania opracowanych przez Doktoranta: modelu matematycznego wymiany ciepła obiektów mieszkalnych na powierzchni Księżyca i rozwiązujących go numerycznie procedur w środowisku *MatLab* do różnorodnych analiz energetycznych budynków księżycowych w warunkach niskiego usłonecznienia lub braku usłonecznienia, możliwości wykorzystania masywnej obudowy budynku jako bufora cieplnego na czas potencjalnej awarii zasilania budynku, a także optymalizacji grubości obudowy budynku w celu równoważenia jego bilansu cieplnego. Wskazano także na konieczność zredukowania czasu obliczeń poprzez wykorzystanie wydajniejszych komputerów, w tym umożliwiających obliczenia równoległe.

W rozdziale siódmym zawarto „Wykaz obiektów”, tj. rysunków, tabel oraz wzorów, które zostały zamieszczone w pracy doktorskiej. Mam tu jedynie zastrzeżenie do tytułu tej części dysertacji oraz faktu traktowania jej jako rozdziału pracy. Moim zdaniem, logiczniejsze byłoby zamieszczenie ww. wykazów jako osobnych, nienumerowanych części rozprawy na jej końcu.

Rozdział 8 stanowi wykaz literatury cytowanej w pracy. Liczba cytowanych prac znacznie przekracza zwyczajowe wartości i mogłaby zostać ograniczona dzięki eliminacji szeregu publikacji z obszaru kosmonautyki, zwłaszcza o charakterze popularno-naukowym i dotyczących jej historii. Są one uporządkowane w kolejności cytowania, co jest zwykle stosowane w czasopismach naukowych. Osobiście uważam, że prace umieszczone w wykazie literatury prac doktorskich powinny być ponumerowane i uporządkowane w kolejności alfabetycznej nazwisk jej pierwszych autorów, co ułatwia ich znalezienie lub sprawdzenie w wykazie prac konkretnego autora. Oczywiście, rozumiejąc ograniczenia Doktoranta wynikające z Jego niepełnosprawności (jest osobą niewidomą) i konieczności korzystania przez Niego ze specjalistycznego oprogramowania do pisania oraz edycji tekstu i rysunków, nie traktuję tego jako zarzutu. Jednak w przypadku publikacji całej pracy doktorskiej lub jej fragmentu, proponuję alfabetyczne uporządkowanie wykazu literatury.

Powyższe uwagi dyskusyjne i krytyczne nie wpływają na moją wysoką ocenę rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Marcina Kaczmarzyka.

5. Uwagi szczegółowe

W niniejszej części recenzji zawarłem uwagi o bardziej szczegółowym charakterze, głównie zauważone przeze mnie nieliczne nieścisłości językowe, drobniejsze błędy merytoryczne i redakcyjne oraz błędy w nomenklaturze naukowej.

- W wielu miejscach pracy pojawiają się cytowania „mieszane”, np. na str. 37: „... Pogorzelski 1979 [116] ...”, choć generalnie stosowane są cytowania przez podanie numeru w wykazie literatury. Należałoby ujednoczyć sposób cytowania prac, najlepiej wg numeru w wykazie, co jest zwykle stosowane w naukach technicznych i ścisłych.
- W pracy zastosowano bardzo rzadki sposób numerowania wzorów w nagłówkach do nich wraz z podaniem ich tytułu i źródła, np. Wz. 2.9-4 *Całkowita słoneczna irradancja dla dowolnego ciała niebieskiego [56]*. Nie wiem, czy wynika to z zastosowania oprogramowania dla niewidomych, ale sugerowałbym, aby w przypadku publikacji rozprawy zastosować zwyczajowo stosowaną numerację w obustronnych nawiasach zwykłych, np. (2.9-4).
- W rozdziale 2.7.2, pisząc o zbieżności Metody Różnic Skończonych, Doktorant cytuje publikacje z zakresu fizyki budowli: Pogorzelskiego z 1976 r. i Kisilewicz z 2009 r. w przypadku schematu jawnego MRS oraz Wiśniewskich z 1994 r. w przypadku schematu niejawnego. Moim zdaniem lepiej byłoby zacytować jakiś podręcznik poświęcony w całości MRS, np. D. Pottera „*Metody obliczeniowe fizyki*” - PWN 1977;
- W Tab. 2.9-1 brak jednostek dla średniej gęstości, a w Tablicy 2.9.3 dla promienia kartograficznego;
- W pracy często stosuje się słowo „uzależnienie” zamiast „zależność”, np. pod Rys. 2.9.8 „uzależnienie ciepła właściwego regolitu od jego temperatury należy uznać za nieodzowny element modelu termicznego księżycowego gruntu” – powinno być „uwzględnienie zależności ciepła właściwego regolitu od jego temperatury...”;
- Do wyjaśnienia symboli we wzorach 3.3-1 - 3.3-4 przydatne byłyby schematyczne rysunki;
- W rozdz.3.4.4 nie podano jaki schemat dyskretyzacji domeny czasu przyjęto w środowisku MatLab przy rozwiązaniu równań modelu metodą MES;
- Na Rys.3.4-13 widoczne są dziwne nieregularności rozwiązania dla czasu $t = \sim 0$ DZ i $t = \sim 15$ DZ? Ta sama uwaga dotyczy Rys. 3.4-18. Proszę o wyjaśnienie, jakie były przyczyny tego zjawiska zdaniem Doktoranta – fizyczne czy numeryczne?
- Pod Rys. 3.4-18 napisano „... na spągu warstwy regolitu uzyskano średnią temperaturę 256,5005K ...” – moim zdaniem nie ma sensu podawanie wyników rozwiązania numerycznego temperatury z dokładnością do 4 miejsca po przecinku;

- Pod Rys. 3.5-2 napisano o „... postaci geotermalnego strumienia ciepła ...” – proszę o wyjaśnienie, czy w przypadku strumienia ciepła w gruncie księżycowym można mówić o „geotermalnym” strumieniu, czy używa się innego określenia?
- Proszę o wyjaśnienie, na jakiej podstawie w pierwszym wierszu p. 3.5.2.4 napisano, że „Wynik symulacji nr 46 uważa się tu za najbardziej dokładny ...”;
- Opis w p.3.5.3.3 poszczególnych analizowanych przypadków modelu i jego wyników jest niezbyt czytelny, gdyż powoływanie się na konkretne symulacje nie jest intuicyjne i wymaga wielokrotnego odnoszenia się do opisów tych przypadków – lepiej byłoby nadać tym przypadkom skrótowe, intuicyjne nazwy;
- W opisie warunków brzegowych na Rys. 3.7-1 powołano się na symbole brzegów E19 i E20, których nie ma na tym rysunku.;
- W Tab.3.7.5 nie podano jednostek, w których wyrażono wartości całkowitych strumieni ciepła;
- Symbole we wzorach 3.7.3 – 3.7.5 są niejasne - szkoda, że nie zamieszczono schematycznego rysunku, na którym wyjaśniono by symbole i sposób obliczeń tych wielkości;
- Treść skryptu pod Tab.3.8.1 powinna być wyraźniej wydzielona z tekstu pracy;
- Proszę o wyjaśnienie, dlaczego we wszystkich symulacjach w p. 3.8.2.1 przyjęto lokalizację budynków na 20° szerokości selenograficznej północnej;

Rozprawa jest na ogół starannie zredagowana i napisana dość poprawną polszczyzną, choć w tekście występuje sporo błędów interpunkcyjnych, tzw. literówek, co może wynikać z używania przez Doktoranta oprogramowania do edycji tekstu i rysunków dla osób niewidomych. Ponadto analiza wyników obliczeń jest opisana głównie werbalnie, choć w wielu przypadkach bardziej czytelne i zwarte/krótsze byłoby wykonanie stosownych wykresów, rysunków czy schematów. Zapewne wynika to z niepełnosprawności Doktoranta i sposobu analizy przez Niego wyników symulacji. Nie wpływa to na moją wysoką ocenę rozprawy doktorskiej, ale może to stanowić pewien problem przy publikacji artykułów naukowych, których maksymalna dopuszczalna długość jest najczęściej ograniczana przez wydawcę czasopisma.

Proponuję, aby przed ewentualną publikacją fragmentów lub całości rozprawy Doktorant uwzględnił powyższe uwagi i życzliwe sugestie oraz poprawił wymienione powyżej drobne błędy merytoryczne i edycyjne.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Wyniki badań wykonanych przez Pana mgr inż. Marcina Kaczmarzyka wskazują, że wymiana ciepła między budynkiem a jego otoczeniem na powierzchni Księżyca i na Ziemi jest bardzo odmienna i wymaga użycia zupełnie innego modelu matematycznego do analizy bilansu cieplnego mieszkalnych budowli księżycowych. Jego sformułowanie wymagało szczegółowej analizy zjawisk fizycznych towarzyszących wymianie ciepła na i przy powierzchni Księżyca, ze szczególnym uwzględnieniem promieniowania słonecznego i podczerwonego emitowanego do otoczenia budynku (regolitu i przestrzeni kosmicznej). Opracowania wymagało też wyznaczenie mocy wewnętrznych źródeł ciepła oraz dobór i zwymiarowanie układów zaopatrzenia oraz magazynowania energii, dla których najważniejszym kryterium doboru jest masa oraz niezawodność i trwałość w trudnych warunkach środowiska księżycowego.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych Pana mgr inż. Marcina Kaczmarzyka zaliczam:

- sformułowanie 3-wymiarowego modelu matematycznego wymiany ciepła między mieszkalnym budynkiem na powierzchni Księżyca a jego otoczeniem oraz opracowanie metody jego rozwiązania numerycznego za pomocą modułu *ThermPDE* środowiska *MatLab*;
- opracowanie przybliżonego modelu astrometrycznego do wyznaczania pozycji Słońca na księżycowym niebie na potrzeby symulacji energetycznych, który to model został następnie zweryfikowany przez porównanie z dokładnymi obliczeniami astrometrycznymi;

- Opracowanie na podstawie literatury zestawu parametrów fizycznych niezbędnych do wykonania obliczeń bilansu cieplnego budowli na Księżycu za pomocą opracowanego przez Doktoranta modelu matematycznego;
- Opracowanie na podstawie literatury zestawu danych do wyznaczenia zysków wewnętrznych od wyposażenia i ludzi w mieszkalnych budynkach na powierzchni Księżycy;
- Wskazanie układów zaopatrzenia w energię budynków mieszkalnych, zlokalizowanych na różnych szerokościach selenograficznych Księżycy, które charakteryzują się najmniejszą masą.
- Wykonanie szeregu szczegółowych analiz, w tym studium przypadku, które wykazały, że możliwe jest efektywne wykorzystanie energii promieniowania słonecznego do zapewnienia niezależności energetycznej budynkom lokalizowanym na powierzchni Księżycy;

Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością najważniejszych prac związanych z tematem doktoratu, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu fizyki cieplnej budowli, metod numerycznych i kosmonautyki, a także praktyczną z zakresu obliczeń numerycznych i opracowania ich wyników.

Moim zdaniem, Jego rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie ciekawego i trudnego problemu naukowego, a także wykazuje Jego predyspozycje do pracy naukowej, ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z tym stwierdzam, że w mojej ocenie rozprawa doktorska Pana mgra inż. Marcina Kaczmarczyka zatytułowana „*Modelowanie energetyczne mieszkalnych obiektów budowlanych lokalizowanych na powierzchni Księżycy*” spełnia wszystkie wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. 2018 poz. 1668) z późniejszymi zmianami (tekst jednolity z dnia 3 marca 2022 r. - Dz.U. 2022 poz. 574) oraz wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Równocześnie, ze względu na innowacyjną i trudną tematykę oraz wysoki poziom merytoryczny, wnioskuję o wyróżnienie pracy.

Danion Gwin