

Profesor dr hab. inż. Damian BEBEN  
Wydział Inżynierii Lądowej i Architektury  
Politechnika Opolska ul. Katowicka 48, Opole 45-061, Polska  
e-mail: [d.beben@po.edu.pl](mailto:d.beben@po.edu.pl), telefon: +48 693 205 658  
ORCID: 0000-0001-8331-4248  
Wymieniony wśród 2% najlepszych naukowców na świecie,  
zgodnie z raportem Uniwersytetu Stanforda i Elsevier

Opole, 13 sierpnia 2024 r

## RECENZJA

pracy doktorskiej Muhammad[a] FAWAD zatytułowanej:  
**Oparty na BIM system monitorowania stanu mostów wspierany przez  
techniki immersji i rekonstrukcji 3D, do aktualizacji modeli analitycznych i zasobów**

### 1. Podstawa opracowania

Recenzja została sporządzona na zlecenie Przewodniczącego Rady Wydziału Inżynierii Lądowej, Geodezji i Transportu Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Marcina STANKA (pismo nr RDILGT.512.2024 z dnia 5 lipca 2024 r., data wpływu 23 lipca 2024 r.).

Recenzowana praca doktorska została napisana pod kierunkiem profesora Marka SALAMAKA z Politechniki Śląskiej oraz profesora Kálmána KORISA z Uniwersytetu Technologii i Ekonomii w Budapeszcie.

### 2. Ogólna ocena pracy doktorskiej

Praca doktorska napisana jest w języku angielskim na 129 stronach, wliczając dwustronicowe streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazy skrótów, rycin i tabel, a także trzy załączniki z opracowanymi kodami, praca doktorska dostarczona została również na płycie CD. Praca składa się z sześciu rozdziałów oraz spisu literatury obejmującego 243 pozycje. Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny i dotyczy interdyscyplinarnych zagadnień związanych z inżynierią lądową (w szczególności zarządzania mostami), technologiami cyfrowymi, nowoczesnymi i inteligentnymi czujnikami oraz monitorowaniem stanu konstrukcji. Temat rozprawy jest bardzo ważny z naukowego i praktycznego punktu widzenia, ponieważ dotyczy zagadnień utrzymania i monitorowania infrastruktury krytycznej, takiej jak mosty, z wykorzystaniem nowoczesnego podejścia do zagadnienia. Z tego powodu wybór tematu jest trafny i zgodny z aktualnymi trendami w inżynierii lądowej, a w szczególności mostowej. Podsumowując, podejście doktoranta do tego tematu jest jak najbardziej właściwe.

### 3. Szczegółowa ocena pracy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Rozdziały 4 i 5 są kluczowe dla pracy ze względu na motywacje badawcze i tezę sformułowaną we wstępie.

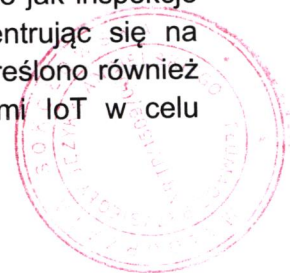
Pierwsza część pracy (Rozdział 1: Wprowadzenie) dotyczy tła pracy doktorskiej oraz motywacji doktoranta do podjęcia tematu i zakresu badań.

Rozdział 2 przedstawia zagadnienia systemów zarządzania mostami (ang. bridge management systems, BMS) i ich zastosowań w SHM mostów, omawia tradycyjne metody, takie jak inspekcje wizualne. W rozdziale omówiono również rolę technologii IoT w SHM, koncentrując się na inteligentnych czujnikach bezprzewodowych i komponentach do ich rozwoju. Podkreślono również korzyści płynące z integracji SHM z BMS, które można uzupełnić narzędziami IoT w celu wyeliminowania niedociągnięć tradycyjnych metod kontrolnych.

ROLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Rada Dyscypliny Inżynieria Lądowa,  
Geodezja i Transport

wpłynęło dnia 24.09.2024

nr 193 zał. -



W rozdziale 3 omówiono zastosowanie BIM i technologii cyfrowych w inżynierii mostowej, w tym nowych technologii, takich jak programowanie wizualne, sztuczna inteligencja (AI), metody rekonstrukcji 3D oraz rzeczywistość wirtualna/rozszerzona/mieszana (VR/AR/MR) do oceny i monitorowania stanu mostów. Rozdział wprowadza również koncepcję cyfrowego bliźniaka (ang. digital twin) mostu, podkreślając jego zalety i zastosowania w zrównoważonym rozwoju.

Rozdział 4 przedstawia techniki modelowania mostów, koncentrując się na modelowaniu analitycznym i BIM. Metoda analizy elementów skończonych (ang. finite element analysis, FEA) została wykorzystana do oceny uszkodzeń mostów, proponując system SHM. Dwa studia przypadków pokazują praktyczne zastosowanie modelowania analitycznego i metod testowania obciążenia mostów. W rozdziale tym omówiono również integrację zaawansowanych technologii, takich jak BIM, IoT i MR w domenie SHM.

Rozdział 5 przedstawia studium przypadku mostu łukowego, które wykorzystuje techniki rekonstrukcji 3D, koncentrując się na opracowywaniu modeli 3D. Analiza elementów skończonych (FEA) jest wykorzystywana do symulacji stanu uszkodzenia mostu i zaproponowania instalacji systemu SHM mostu do monitorowania jego parametrów wytrzymałościowych. Dodatkowo, rozdział ten omawia rozwój nowatorskiego podejścia do zarządzania zasobami infrastruktury, koncentrując się na rozwoju immersyjnej platformy cyfrowego bliźniaka mostu (ang. Immersive Bridge Digital Twin Platform, IBDTP). Platforma automatyzuje system SHM mostu i wykorzystuje urządzenia MR do immersyjnego podejmowania decyzji.

W rozdziale 6 sformułowano wnioski końcowe z pracy doktorskiej, w tym omówienie wyników realizacji celów badawczych i nowych osiągnięć naukowych. Potwierdzam, że wskazane osiągnięcia mają duże znaczenie z naukowego i praktycznego punktu widzenia dla SHM mostów. Na uwagę zasługuje fakt, że autor określił również kierunki dalszych badań w przedmiocie pracy, co świadczy o dojrzałości badawczej doktoranta.

#### **4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

Poniżej przedstawiam krytyczne uwagi i dyskusję na temat poszczególnych rozdziałów pracy doktorskiej.

##### **4.1. Uwagi merytoryczne**

###### **Rozdział 2:**

- Jakie są zalety i wady proponowanego podejścia do monitorowania mostów?
- Jaka jest niezawodność i dokładność proponowanej metody SHM w porównaniu z innymi metodami, np. technikami satelitarnymi?
- Czy istnieją jakieś ograniczenia początkowe dla proponowanego podejścia do monitorowania mostów?
- Czy doktorant proponuje nowe podejście do zarządzania mostami (BMS - rys. 2.1), czy modernizuje jego elementy? Należy to wyraźnie podkreślić.
- Mosty są infrastrukturą krytyczną. Jak chronić dane/system przed nieautoryzowanym dostępem, co jest szczególnie ważne podczas wojny?
- Proszę wskazać najważniejsze wady IoT w kontekście SHM.

###### **Rozdział 3:**

- Moim zdaniem BIM nie zmienia podejścia opisanego w podrozdziale 3.3.3 (str. 24), ponieważ jedynie zbiera i analizuje wprowadzane przez nas dane. W większości przypadków opracowany model FE ma pewne uproszczenia (w zależności od złożoności danej konstrukcji). W jaki

sposób BIM uwzględni, na przykład, interakcję pomiędzy płytą żelbetową a dźwigarami stalowymi?

- Cyfrowy bliźniak (podrozdział 3.4, strona 28) będzie zależał od jakości wprowadzonych danych. Jak zoptymalizować wiarygodność danych, aby uzyskane wyniki były pomocne i nie powodowały tzw. fałszywych alarmów?
- Podrozdział 3.5.4 (strona 34). Jakie były kryteria wyboru konstrukcji mostu? Osobiście bardziej podoba mi się koncepcja 1.

#### **Rozdział 4:**

- Strona 46: Jeśli stan techniczny mostu jest zły (występują pęknięcia) i nie są planowane żadne prace naprawcze, w jaki sposób instalacja SHM poprawi jego bezpieczeństwo w ciągu najbliższych 15 lat?
- Strona 46: Jakie parametry materiałowe (stal i beton) zostały użyte do modelowania FEM? Czy były to parametry projektowe czy rzeczywiste?
- Strona 48: Dlaczego beton jest definiowany jako materiał jednorodny, skoro w zasadzie jest traktowany jako materiał niejednorodny, a w tym przypadku tym bardziej, ponieważ jest spękany? Jaki model konstytutywny został wybrany dla betonu spękanego?
- Podrozdział 4.3.2: Dobrze byłoby pokazać, np. na rysunku, porównanie wartości uzyskanych z FEM z wartościami eksperymentalnymi. Wówczas można by łatwo wykazać poprawność symulacji FEM.
- Podrozdział 4.3.4, rys. 4.6: Czy wykonanie rowków o szerokości 7-8 mm w celu zainstalowania czujników nie spowoduje zbyt dużych uszkodzeń już poważnie zdegradowanego dźwigara?
- Podrozdział 4.34: Jaki jest szacunkowy koszt SHM dla mostu na Węgrzech?
- Podrozdział 4.4.3: Wiem, że nie jest to główny element pracy doktorskiej, ale dobrze byłoby podać więcej szczegółów na temat modelowania FEM analizowanych mostów, np. jakie modele konstytutywne zastosowano dla betonu, cięgieł [w oryginale: tendons – ścięgien, lecz prawdopodobnie jest to tzw. literówka], w jaki sposób uwzględniono fundamenty, metodę łączenia elementów, liczbę i rodzaj elementów skończonych, warunki brzegowe, analizę liniowo-nieliniową itd. Czy przeprowadzono analizę wrażliwości siatki elementów skończonych?
- Równanie 5.3 (strona 61):  $U_d$  oznacza przemieszczenia obliczone (teoretyczne), a w tabeli 4.2  $U_d$  oznacza przemieszczenia zmierzone. Należy wprowadzić różne oznaczenia lub w opisie równania 5.3 jest błąd (??).
- Podrozdział 4.4.6: Jak powszechnie wiadomo, sygnały odczytywane z czujników są obciążone tzw. „szumem pomiarowym”. Jakich filtrów użyto do „oczyszczenia” sygnałów z LVDT i akcelerometrów?
- Rys. 4.19(c): Czy przebieg PVA jest pokazany po czy przed filtrowaniem sygnału? W jaki sposób sygnał został odszumiony?

#### **Rozdział 5:**

- Rys. 5.7, Tabela 5.2: Rozumiem, że zmierzone wartości odnoszą się do testów mostu przy rzeczywistym ruchu pojazdów (??). Obliczone wartości dotyczą przemieszczeń projektowych czy innych (??). Czy oba obciążenia są porównywalne?

#### **Rozdział 6:**

- Moim zdaniem, głównym ograniczeniem w powszechnym stosowaniu takiego innowacyjnego podejścia do monitorowania mostów i infrastruktury w szerszym ujęciu są ograniczenia zarządzających tymi obiektami. Jak można temu zaradzić?

- Mosty są infrastrukturą krytyczną, a ich systemy monitorowania powinny podlegać szczególnej ochronie. Czy opracowany system monitorowania ma jakąkolwiek ochronę przed „ingerencją z zewnątrz”?

#### 4.2. Uwagi redakcyjne i edytorskie

- Strona 6, u dołu strony: powtórzone zdania.
- Sposób cytowania powinien być utrzymany w kolejności; strony 13, 42, 43, 44.
- Strona 14: MEMS oznacza systemy mikroelektromechaniczne, a nie systemy mikroelektrochemiczne.
- Strony 23 i 24: metoda cytowania, np. [104] podkreśliła... Powinno być: Chase [104] podkreśliła... itd.
- Strona 48: powinno być "współczynnik Poissona" zamiast "współczynnik zatrucia" [eng. poison].
- Numeracja wzorów w rozdziale 4 powinna być przedstawiona następująco: 4.1, 4.2 itd. zamiast 5.1, 5.2, ...
- Spis literatury: drobne błędy i nieścisłości: 1, 29, 38, 56, 138, 153, 185, 186, 198, 207, 2012, 217, 218, 2019, 229, 232.

#### 5. Podsumowanie

Doktorant samodzielnie rozwiązał zadanie badawcze, przeanalizował dostępną literaturę, sformułował zakres i cel, a następnie konsekwentnie dążył do jego udowodnienia. Postawione we wstępie cele pracy doktorskiej zostały osiągnięte. Zaproponowany SHM mostów jest nowym i oryginalnym podejściem do badania tego typu konstrukcji. Opracowany SHM, wyposażony w technologie cyfrowe, inteligentne czujniki i Internet Rzeczy, został przetestowany i zweryfikowany na wybranych konstrukcjach mostowych. Powyższe uwagi krytyczne i dyskusyjne nie umniejszają wartości naukowej i praktycznej pracy. Wierzę, że istnieje duża szansa, że uzyskane wyniki badań zostaną opublikowane w czasopiśmie o dużym wpływie, a opracowany SHM może zostać szeroko wdrożony w praktyce jako system zarządzania mostami.

W mojej opinii recenzowana praca doktorska, przygotowana przez [pana] Muhammad[a] FAWAD, zatytułowana: „BIM-based Framework of Bridge Health Monitoring Supported by Immersive and 3D Reconstruction Techniques for Analytical and Asset Model Updates” prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Podsumowując, praca doktorska spełnia wszystkie wymagania określone w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz. U. 2022 pozycja 574 z późniejszymi zmianami).

W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej, Geodezji i Transportu Politechniki Śląskiej o dopuszczenie do publicznej obrony recenzowanej pracy doktorskiej [pana] Muhammad[a] FAWAD.

[podpis nieczytelny]

---

Ja, Małgorzata Sokołowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na listę tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi plikiem pdf sporządzonym w języku angielskim. Gliwice, dnia 19 września 2024 r. Repertorium nr 583/2024.

TŁUMACZ PRZYSIĘGŁY  
JĘZYKA ANGIELSKIEGO  
*Małgorzata Sokołowska*  
mgr Małgorzata Sokołowska

