

Recenzja spełnia wymagania formalne

Przewodniczący Rady Dyscypliny
Inżynierii Lądowej i Transport

[Signature]
dr hab. inż. Marcin Staniek, prof. PŚ

Warszawa, dn. 19.02.2021r.

Dr hab. inż. Wojciech TROCHYMIAK

Zakład Geotechniki, Mostów i Budowli Podziemnych, Instytut Dróg i Mostów

Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

Al. Armii Ludowej 16

00-637 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina JASIŃSKIEGO

pt. „Modelownie i optymalizacja wybranego typu obiektów mostowych
w środowisku BIM”

Promotorem pracy doktorskiej jest **dr hab. inż. Marek SALAMAK, prof. PŚ**
z Katedry Mechaniki i Mostów Politechniki Śląskiej.

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej i Transport Politechniki Śląskiej z dnia 17 grudnia 2020 roku oraz pisma dr hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ – Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej i Transport Politechniki Śląskiej z dnia 21 grudnia 2020 roku.

2. Ocena rozprawy

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa została przedstawiona w jednym tomie na 341 stronach formatu A4. Składa się z 7 rozdziałów (302 strony) stanowiących zasadniczą część pracy, poprzedzonych spisem treści (strony I-III) i wykazem skrótów (strony IV-V). Końcowa część pracy zawiera bibliografię (22 strony, w tym książki, czasopisma i referaty - 227 pozycji; normy, specyfikacje i dokumenty prawne - 38 pozycji; repozytoria i źródła imienne - 9 pozycji oraz programy i inne przywołania - 12 pozycji). Prace badawcze, ich opis i wyniki badań przedstawiono w rozdziałach 4, 5 i 6. Rozdziały 2 ÷ 6 zakończone są podsumowaniem, natomiast syntetyczne podsumowanie i wnioski końcowe przedstawiono w rozdziale 7. Praca zawiera również Załącznik A (13 stron), w którym zawarto formuły obliczeniowe parametrycznej trasy kabla. Streszczenie polskie i angielskie (3 strony) zamieszczono na końcu pracy. Praca zawiera 190 podpisanych rysunków i kilkadziesiąt rysunków zawartych w zatytułowanych tablicach (47) oraz w tablicy Z-1 (12 stron).

W rozdziale 1 (*Wstęp*) zawierający Wprowadzenie, Cele pracy oraz Strukturę i zakres pracy uzasadniono celowość podjętej tematyki badań. Podano sposób i zakres realizacji celów. Doktorant jako cel zasadniczy dysertacji przyjął uzyskanie odpowiedzi na wyszczególnione poniżej pytania:

1. *Czy możliwe jest bezpośrednie wykorzystanie środowisk BIM do przeprowadzenia analiz optymalizacyjnych zdefiniowanych poprzez funkcję celu, zmienne oraz*

Wpłynęło dnia 22.02.2021 r.

ograniczenia? Jeżeli nie, to jak duży nakład pracy i jak obszerny zakres zagadnień wiązać się może z ich rozszerzeniem?

2. Jakie cechy powinien wykazywać model BIM, aby możliwe było przystosowanie go do obsługi przez określony algorytm optymalizacyjny przy jednoczesnym zachowaniu jego przydatności i możliwości wykorzystania w kolejnych etapach procesu inwestycyjnego?
3. Z jak dużymi ograniczeniami wiąże się uchwycenie w ujęciu BIM podstawowych cech geometrycznych i funkcjonalnych elementów infrastruktury mostowej i w jakim stopniu wpływają one na przydatność modelu w procesie optymalizacji?
4. Czy otwarte formaty zapisu i wymiany danych – zgodne z tzw. nurtem otwartego BIM (ang. OpenBIM) – są wystarczające do przeprowadzenia procesu optymalizacji? Jakie ograniczenia w kontekście modelowania mostów niosą ze sobą otwarte formaty zapisu i wymiany danych i w jakim stopniu oddziałują na pracochłonność w budowie modelu optymalizacyjnego?
5. Jaką przydatność w kontekście przytaczanych wyżej analiz wykazują zyskujące coraz większą popularność i stopniowo włączane w definicję metodyki BIM środowiska tzw. programowania graficznego?

Doktorant sformułował również cele dodatkowe nazwane celami pobocznymi.

1. Zebranie doświadczeń z dziedziny optymalizacji konstrukcji z propozycją ich wykorzystania w połączeniu z BIM. Ich efektem jest klasyfikacja metod i podejść ze względu na przestrzenny zasięg oddziaływania i kojarzoną z BIM umowną wymiarowość (np. BIM 3D, 4D, 5D itd.).
2. Opracowanie nowej, wykorzystującej algorytm genetyczny i techniki uczenia maszynowego procedury doboru sprzężenia konstrukcji statycznie niewyznaczalnych.

Istotą wyżej wymienionych celów pracy jest określenie zakresu czynności niezbędnych do przeprowadzenia skutecznego procesu optymalizacji wybranego typu obiektów mostowych z zastosowaniem odpowiednich narzędzi (programów) klasy BIM.

Wybrany przez Doktoranta typ obiektów mostowych dotyczy drogowych, płytowo-belkowych mostów i wiaduktów z betonu sprężonego o schemacie statycznym belki ciągłej. Rozwiązania konstrukcyjne tego typu są często projektowane i budowane na świecie oraz w Polsce. Stanowią znaczną część betonowych obiektów mostowych zbudowanych i planowanych do wybudowania w ramach prowadzonych na terenie Polski drogowych inwestycji infrastrukturalnych.

Projektowanie obiektów mostowych, z betonową konstrukcją nośną, w szczególności z betonu sprężonego z uwzględnieniem metodologii BIM, jest jeszcze w Polsce sporadycznie stosowane. Prace dotyczące modelowania i wieloaspektowej optymalizacji wybranego typu obiektów wraz z doбором parametrów sprzężenia, w kontekście metodologii BIM i opracowanych algorytmów, są nowatorskie.

Zawężenie obszaru analiz do wyszczególnionych obiektów umożliwia według Doktoranta wiarygodne i stosunkowo łatwe porównanie powszechnie stosowanego, tradycyjnego podejścia projektowego z przytaczaną w pracy jego zaalgorytmizowaną wersją.

W związku z tym należy stwierdzić, że temat podjęty przez Doktoranta dotyczący rozwoju modelowania i optymalizacji konstrukcji wybranej grupy obiektów mostowych jest zasadny i wnosi pewien element nowości.

W rozdziale 2 (*Teoria i podstawy pracy badawczej*) przedstawiono ogół zagadnień związanych z metodyką BIM, w szczególności jej zastosowania w procesie budowlanym oraz opis metod optymalizacji i predykcji, z pogranicza matematyki i informatyki. Dokonano tu przeglądu literatury z zakresu zagadnień inżynierskich, w szczególności z dziedziny optymalizacji obiektów i procesów. Przywołano, między innymi, założenia algorytmu genetycznego i uczenia maszynowego, w tym sieci neuronowych.

Przedstawiono także, wdrożone w kraju i na świecie, podejścia optymalizacji konstrukcji dzieląc je na część dotyczącą ogólnie formułowanych problemów optymalizacyjnych oraz część poświęconą integracji algorytmów optymalizacyjnych z metodyką i narzędziami klasy BIM.

W rozdziale 3 (*Procesy optymalizacyjne w infrastrukturze transportowej*) kontynuowano przegląd literatury w formie przywołania podstawowych pojęć i założeń niezbędnych do pełnego i uporządkowanego odbioru pracy. Przytoczono zagadnienia formułowania matematycznej postaci problemów optymalizacyjnych funkcjonujących w zakresie infrastruktury transportowej.

Na szczególne podkreślenie zasługuje **autorska klasyfikacja procesów ze względu na zasięg oraz warstwowość**. W każdej wydzielonej klasie ujęto możliwe do zastosowania podejścia dotyczące definiowania funkcji celu, dostępnych metod i algorytmów optymalizacyjnych oraz wdrożenia technicznych aspektów metodologii BIM.

Dokonano podziału procesów optymalizacyjnych ze względu na rozmiar i wyróżniono *zasięg ogólnoinwestycyjny* - dotyczący projektowania ciągów komunikacyjnych, *zasięg obiektowy* - zawężony do określonego jego fragmentu, w szczególności obiektu mostowego, oraz *zasięg elementowy* - skupiony na wydzielonej z obiektu części.

W ramach opisu *zakresu ogólnoinwestycyjnego* przedstawiono różnice między technologiami BIM i GIS (Systemem Informacji Geograficznej), na przykład w odniesieniu do projektowania algorytmów optymalizacyjnych tras komunikacyjnych na podstawie numerycznych modeli terenu.

Sformułowano **autorski algorytm optymalizacji przebiegu dróg**, nazwany *J**, przedstawiony na rys. 29 pracy (str. 79), który stanowi rozbudowaną wersję algorytmu *A**.

Algorytm *A** z kolei jest jedną z metod inspekcji grafów, który powstał po odpowiednim zmodyfikowaniu algorytmu Dijkstry (poszukiwanie najkrótszej ścieżki przy odpowiednich założeniach w grafie), przystosowany do uwzględniania skumulowanych kosztów (określanych po wyprowadzeniu całego wariantu trasy) w funkcji kosztu drogi.

W rozdziale tym zadeklarowano także, że opracowywany system optymalizacji płytowo-belkowych obiektów mostowych, ze względu na rozmiar, będzie miał zasięg obiektowy i będzie w **klasie warstwowości w zakresie od 1D do 5D**, który ilustruje rys. 45 (str. 107).

W rozdziale 4 (*Modele BIM obiektów mostowych*) przeanalizowano (studia przypadków) możliwości oraz ograniczenia metodologii BIM w kontekście modelowania i obsługi infrastruktury komunikacyjnej, w szczególności obiektów mostowych. W tym celu analizowano jeden projekt koncepcyjny usytuowania ciągu drogowego w istniejący obszar miejski w Gliwicach oraz trzy rzeczywiste, zróżnicowane co do formy konstrukcyjnej i systemów sprzężenia oraz technologii budowy obiekty mostowe, w tym:

- *wiadukt drogowy z 2018r.* usytuowany w ciągu drogi ekspresowej S3 (dwie niezależne konstrukcje nośne pod każdą jezdnią) o rozpiętościach przęsł 36,0 m + 36,0 m, dwubelkowym, płytowo-belkowym pomoście, szerokości 14,67m, wybudowany na rusztowaniach stacjonarnych,
- *most drogowy z 2008r.* o hybrydowej formie konstrukcyjnej (most podwieszony o cechach mostu extradosed), usytuowany w ciągu drogi 969 przez dolinę Dunajca w Starym Sączu, rozpiętościach przęsł 77,92 m + 143,00 m + 77,92m, skrzynkowym przekroju poprzecznym z ażurowymi (w formie stalowych krzyżulców o przekrojach rurowych) środnikami i betonowymi (górnej i dolnej) centrycznie sprężonymi płytami. Układ sprężenia i podwieszenia konstrukcji, z powodu budowy metodą nasuwania podłużnego i formy konstrukcyjnej nośnej, składa się z podłużnych cięgien wewnętrznych w obu płytach pomostu, podłużnych cięgien zewnętrznych i wewnętrznych cięgien poprzecznych oraz lin podwieszeń z zakotwieniami na pylonach i rozbudowanymi, zewnętrznymi, stalowymi elementami zakotwień (stopień skomplikowania geometrii mosty ilustrują rys. 64-68 i rys. zamieszczone w tab. 14, str. 130-134 pracy),
- *wiadukt drogowy (estakada) z 2012r.* usytuowany w ciągu ul. Perseusza nad terenami PKP w Gliwicach o przekroju skrzynkowym z betonu sprężonego, wykonany w technologii nasuwania podłużnego, rozpiętościach przęsł 35,0 + 47,0 + 45,5 + 46,0 + 42,5 m, szerokości 13,2 m, o niwelecie wzdłuż linii prostej w planie oraz na złożeniu spadku jednostajnego i łuku kołowego w profilu. Na długości spadku liniowego zaprojektowano, z powodu technologii budowy wymagającej stałości geometrycznej powierzchni poślizgu, zmienną wysokość ustroju (rys. 70-74, str. 139 pracy).

Na podstawie rozpoznania zakresu i ograniczeń dotyczących integracji narzędzi BIM i procesów projektowych, wynikającego z wieloletniej praktyki zawodowej oraz wykonanych badań (studiów przypadków), dotyczących odwzorowania wybranych obiektów mostowych, stwierdzono brak dostępu do właściwych funkcjonalnie klas tworzących ich formę oraz trudności w przetwarzaniu klas już istniejących. Dotyczy to środowisk natywnych, jak i otwartego formatu wymiany danych. Stwierdzono, że otwarty format wymiany danych IFC, z powodu statycznego charakteru oraz ograniczonej struktury, nie nadaje się, ze względu na potrzeby prowadzonych badań, do zastosowania w procesach optymalizacji konstrukcji, w szczególności obiektów mostowych.

W końcowej części rozdziału przedstawiono **autorski model BIM** przystosowany do przeprowadzenia zaplanowanych analiz optymalizacyjnych. Wyszczególniono w nim zakres i obsługę docelowej parametryzacji przekroju poprzecznego drogowych, dwubelkowych obiektów mostowych z betonu sprężonego. Opracowany model umożliwia analizowanie różnych aspektów technologii budowy, w tym podziału na etapy budowy oraz analizy kosztów. Potwierdzono, że parametryzację przekroju opracowano na podstawie **przeglądu ponad 800 rzeczywistych rozwiązań** (głównie dokumentacji projektowej) tego typu obiektów mostowych, testując w kontekście możliwości pełnego, parametrycznego ich odtworzenia.

W rozdziale 5 (*Struktura systemu optymalizacji obiektów mostowych wybranego typu*), stanowiącym zasadniczą część pracy, szczegółowo opisano zagadnienia implementacji algorytmu optymalizacyjnego drogowych, płytowo-belkowych obiektów mostowych z betonu sprężonego, budowanych w technologii tradycyjnej z zastosowaniem rusztowań stacjonarnych, w środowisku BIM oraz definicję modelu optymalizacyjnego.

Przewidywanym efektem działania opracowanego systemu optymalizacyjnego jest otrzymanie najkorzystniejszego, w ujęciu zadanej funkcji celu, rozwiązania konstrukcyjnego wskazanego typu obiektów mostowych, spełniającego zdefiniowane w zadaniu ograniczenia geometryczne i wytrzymałościowe.

Problem optymalizacyjny - funkcję celu, zmienne decyzyjne stałe i ograniczenia Doktorant obszernie przedstawił w rozdz. 5.2, w szczególności:

- *funkcję celu* (zależność (5.1)) zdefiniowano jako sumę kosztów wydzielonych części obiektu mostowego z zastrzeżeniem, że uwzględniane są składniki, które przy korekcie wartości zmiennych decyzyjnych podlegają przekształceniom geometrycznym. Wartość funkcji celu jest uzależniona od modelu BIM obiektu mostowego. Poszczególne składowe przedmiary są obliczane na podstawie modelu BIM w wymiarze 5D z uwzględnieniem zależności czasowo-harmonogramowym w wymiarze 4D. Składniki kosztów z przypisanymi im składnikami kosztów jednostkowych zestawiono w tab. 27-29 pracy (str. 185-187),
- *zmienne decyzyjne* jako parametry opisujące geometrię ustroju nośnego zestawiono w tab. 30 i rys. 107-110 pracy (str. 187-192),
- *stałe*, zestawione w tab. 31 (str. 193-195), nie są zmieniane w ramach operacji prowadzonych przez algorytm optymalizacyjny. Jako stałe wyróżniono cechy kształtowane poza projektem branży mostowej (przebieg niwelety w planie i w profilu, szerokości jezdni i chodników, urządzenia bezpieczeństwa ruchu czy ochrony środowiska) oraz cechy jednoznacznie wpływające na koszt (rozpiętości przęseł czy całkowita szerokość pomostu),
- *ograniczenia* stanowią cztery wymagania geometryczno-wytrzymałościowe, szczegółowo omówione na str. 196-199: (1) odpowiednio zdefiniowana poprawność geometryczna obiektu; (2) geometria ustroju jest ukształtowana w taki sposób, że nie koliduje ze skrajnią przeszkody pod obiektem; (3) rozwiązanie konstrukcyjne ustroju nośnego umożliwia wprowadzenie bezkolizyjnego i spełniającego wszystkie wyszczególnione ograniczenia układu sprężenia); (4) rozwiązanie konstrukcyjne umożliwia wprowadzenie zbrojenia w ilości niezbędnej do spełnienia stanów granicznych nośności i użyteczności.

Ogólny schemat modelu optymalizacyjnego ilustruje rys. 116 (str. 200).

Moduły składowe systemu zaprojektowano w taki sposób, aby umożliwiały wzajemną wymianę danych wraz z ich analizą (odczyt, interpretacja, wybór wariantu) w celu automatycznego sterowania procesem. Na podstawie danych pobranych z modelu BIM, możliwe jest wyznaczenie i „przekazanie”, odpowiadającej określonej wartości funkcji celu. Scenariusz obliczeń (sekwencja realizacji odpowiednich modułów i procedur) systemu jest powtarzany niezależnie dla każdego osobnika formującego określone pokolenie wariantów. Po zakończonej analizie całego pokolenia, następuje przekazanie wyników do operatora selekcji algorytmu genetycznego. Warianty przekazane do zbioru rodzicielskiego uczestniczą w krzyżowaniu, a wytworzone w jego ramach osobniki potomne - mutacji. W ich wyniku wyprowadzane są dane dotyczące geometrii nowych, z założenia lepszych względem poprzedniego pokolenia wariantów. Zakodowane w pliku tekstowym dane są odczytywane przez moduł przetwarzania geometrii, stanowiąc wstęp do ewaluacji nowego pokolenia rozwiązań.

W ramach systemu optymalizacyjnego wyróżniono:

- *moduł przetwarzania geometrii*, stanowiący bezpośredni łącznik między modelem BIM (Autodesk Revit) a strukturą kodu przeznaczoną do analiz optymalizacyjnych oraz obsługę

repozytorium plików. Ustrój nośny obiektu mostowego odzwierciedlono jako pojedyncze wystąpienie elementu z klasy belek o przewidzianym, w ramach wewnętrznej definicji, zestawie parametrów geometrycznych i materiałowych nazwanych ramami konstrukcyjnymi. Odpowiednia parametryzacja elementu umożliwia zmiany kształtu przekroju poprzecznego przęsła z poziomu modelu centralnego. Zaprojektowano procedury umożliwiające zmiany i weryfikację geometrii przęsła podczas kolejnych iteracji obliczeń łącznie z odpowiednimi analizami statycznymi i wytrzymałościowymi jak na przykład wyznaczanie charakterystyk geometrycznych dowolnych przekrojów,

- *moduł analizy statycznej* z automatycznym generowaniem, na podstawie danych otrzymanych ze środowiska BIM, zewnętrznych modeli obliczeniowych MES (Autodesk Robot Structural Analysis, w skrócie ARSA), które wraz z arkuszami kombinacji sił wewnętrznych w dźwigarach i płycie pomostowej, „dostarczają” dane pozostałym modułom. W ramach tego modułu przyjęto uproszczenia modeli obliczeniowych, które nie mają znaczącego wpływu na rozkład i wartości sił wewnętrznych w wydzielonych elementach ustroju. Przyjęto pięć poziomów szczegółowości modeli obliczeniowych (tab. 33, str. 213-215) nazwanych odpowiednio LONM 100, LONM 200, LONM 300, LONM 350, LONM 400. Dokonano dekompozycji modelu ustroju nośnego na układ poprzeczny i podłużny. Układ poprzeczny stanowi uproszczony schemat statyczny płyty pomostowej (model na poziomie szczegółowości LONM 100) uwzględniający jej geometrię, a jego analiza jest wykonywana bez zewnętrznego środowiska obliczeniowego (arkusze kalkulacyjne). Układ podłużny odzwierciedla elementy modelu obliczeniowego całości ustroju nośnego umożliwiające wyodrębnienie danych niezbędnych do doboru sprzężenia i weryfikacji stanów granicznych dźwigarów. Analiza statyczna układu podłużnego (poziom szczegółowości LONM 300) jest wykonywana za pomocą środowiska zewnętrznego (ARSA). W dalszej części tego rozdziału opisano szczegóły funkcjonowania modułu analizy statycznej dotyczące struktury współzależności modeli, sposobu uwzględniania obciążeń i oddziaływań, analizowanych kombinacji, odczytu i weryfikacji danych oraz ich przechowywania,
- *moduł doboru sprzężenia, stanowiący „jądro” projektowania konstrukcji sprężonych*, umożliwia dobór parametrów sprzężenia i tras ciągnięć sprężających. Trasa ciągnąca stanowi jedną z kluczowych informacji niezbędnych do dalszych analiz. Przyjęto sparametryzowaną trasę kabla sprężającego, w szczególności dostosowaną do geometrii obiektów dwuprzęsłowych, składającą się z wzajemnie stycznych odcinków prostych i segmentów łukowych odpowiednio opisanych wzdłuż dźwigara. Przedstawiono algorytmy przeznaczone do przetworzenia tras i analizę opartą na *klasach bazowych punktu i segmentu*, nazwanych odpowiednio *TendonPoint* oraz *TendonSegment*. Analizowano dwa typy tras ciągnięć sprężających, nazwanych *kablem pełnym* (rys. 147-148, str. 236) oraz *kablem połówkowym* (rys. 150-151, str. 240), które sprowadzono do *ciągną dyskretnego* o trasie łamanej, opisanej listą punktów dzielących je na określonej długości odcinki. Podstawą parametryzacji obu typów *kabli* jest lista punktów charakterystycznych trasy, uzupełniona o wartość promienia łuku nad podporą pośrednią. Oprócz tras ciągnięć sprężających określa się także *pole przekroju kabla i siłę naciągu oraz jego rodzaj, stałe systemu sprzężenia i dane materiałowe, w tym przede wszystkim moduł sprężystości stali sprężającej*. Jako *stałe systemu* określono zestaw wielkości niezbędnych do wyznaczenia strat sił sprężających. Rozróżniono jednostronne i obustronne naprężanie kabli sprężających.

Procedura doboru pojedynczego układu sprężenia (rys. 154, str. 245), stanowi iteracyjnie powtarzany ciąg czynności obejmujący *ustalenie układu sprężenia, wyznaczenie strat sprężania, wyznaczenie obciążeń równoważnych od sprężenia, analizę statyczną oraz weryfikację stanów granicznych (ograniczenia naprężeń, dekompresji lub zarysowania)*.

W celu usprawnienia procedury doboru sprężenia układu konstrukcyjnego zaadaptowano *algorytm genetyczny* umożliwiający kierowanie procesem przeszukiwania zbioru rozwiązań. Dobrane losowo układy, tworzące *pokolenie początkowe rozwiązań*, są oceniane, a następnie przetwarzane w ramach operatorów algorytmu genetycznego, umożliwiając tworzenie *nowych pokoleń rozwiązań* i ich weryfikację oraz uszeregowanie ze względu na wartość funkcji celu (rys. 155, str. 246).

Ocena, według schematu z rys. 154, dotyczy wszystkich *osobników z pokolenia początkowego*, jak i utworzonych w ramach kolejnych generacji.

Efekty sprężenia, w zależności od parametrów trasy kabla, przewiduje się z zastosowaniem *sieci neuronowej*, głównie celem przyspieszenia *ewaluacji osobników* z pominięciem procesu budowy i zewnętrznego przeliczania modelu obliczeniowego.

Parametry optymalnego sprężenia dobiera się za pomocą zadania optymalizacyjnego. Jako funkcję celu przyjęto całkowitą masę cięgien sprężających tworzących określony układ. Funkcję celu sprowadza się do funkcji dopasowania i poszukuje się minimum z uwzględnieniem składników kary odpowiedzialnych za sztuczne zwiększenie w przypadku niespełnienia przewidzianych w zadaniu ograniczeń. Matematyczną postać funkcji celu opisano zależnościami 5.27-5.30. Parametry i stałe dotyczące pojedynczego cięgna wypadkowego zestawiono w tab. 39 (str. 250-251). Zmienne decyzyjne (tab. 39-40, rys. 157, str. 250-252) są dobierane w trakcie działania algorytmu oraz ograniczenia określające zbiór rozwiązań dopuszczalnych (rys. 158-159, tab. 41-42, str. 253-256).

Algorytm doboru cięgien sprężających stosuje *sieć neuronową* do przewidywania wartości momentów zginających spowodowanych sprężeniem o określonej parametrycznie trasie. Sieć neuronowa zastępuje ciąg czynności wydzielonych na rys. 155., obejmujący obliczenia strat sił sprężających i obciążeń równoważnych od oddziaływania cięgna na element sprężony, sporządzenie i analizę modelu obliczeniowego oraz odczyt wyników.

W testowanym przykładzie prognozowanie wartości momentów, w zależności od geometrii przęsła, zawężono do miarodajnych przekrojów wzdłuż dźwigarów. Optymalizowano układ cięgien naprężonych obustronnie i symetrycznymi trasami względem osi podpory pośredniej, ograniczając liczbę danych wejściowych do pięciu oraz liczbę wartości podlegających predykcji do trzech. Dane wejściowe obejmują rzędną zakotwienia kabla, obie współrzędne punktu przegięcia kabla w przęsle, rzędną kabla nad podporą pośrednią oraz jego promień (analogicznie jak w tab. 40). Ogólną architekturę docelowej sieci neuronowej uogólniającej statyczne efekty sprężenia w postaci momentów w przekrojach kontrolnych, w zależności od geometrii cięgien, przedstawiono na rys. 160. Dalsze szczegóły przedstawiono poprzez zależności 5.31-5.32 i rys. 161 (str. 257-258).

Należy podkreślić, że moduł doboru sprężenia jest **autorską propozycją parametryzacji trasy kabla, przystosowaną do obsługi przez algorytm genetyczny i sieć neuronową, a połączenie tych technik tworzy nowe, stanowiące element większej całości - systemu optymalizacyjnego, podejście w projektowaniu konstrukcji sprężonych, w tym statycznie niewyznaczalnych,**

- *moduł doboru zbrojenia* pasywnego ustroju zawiera szereg procedur umożliwiających wyznaczenie parametrów zbrojenia niezbędnego w betonowych konstrukcjach obiektów

mostowych. Weryfikację stanu granicznego nośności dowolnego przekroju żelbetowego, z lub bez sprężenia, obciążonego siłą osiową, ściskającą lub rozciągającą, oraz jedno- lub dwukierunkowym momentem zginającym, przewidziano dwoma alternatywnymi metodami. W obu metodach zastosowano podejście iteracyjne w oparciu o zależności odkształceniowo-naprężeniowe wbudowanych w przekrój materiałów. Przyjęto, że zniszczenie następuje w momencie przekroczenia odkształceń granicznych któregośkolwiek z komponentów przekroju.

W pierwszej, ogólnej metodzie, zwanej *metodą odkształceń rzeczywistych*, poszukiwano równania płaszczyzny odkształcenia $\varepsilon(y, z)$ generującej bryłę naprężeń równoważącą obciążenie zewnętrzne (y, z - współrzędne w płaszczyźnie przekroju). Metoda ta umożliwia rozwiązanie przypadków obciążonych siłą osiową i zginaniem dwukierunkowym.

Druga metoda, zwana *metodą odkształceń granicznych*, umożliwia wyznaczenie nośności przekroju przy założeniu, że w jednym z jego punktów osiągnięto odkształcenie graniczne, a powstała bryła naprężeń równoważy parę sił zewnętrznych. Opisano ją przy założeniu zginania jednokierunkowego z udziałem siły osiowej, stanowiąc w tym szczególnym przypadku szybszą i łatwiejszą w interpretacji alternatywę pierwszego podejścia.

W dalszej części rozdziału szczegółowo opisano obie metody i przyjęte algorytmy ujęte syntetycznie na rys. 166 (str. 265) i 170 (str. 272).

Zbrojenie płyty pomostu wyznaczono na podstawie uproszczonej analizy statycznej układu poprzecznego z uwzględnieniem odpowiednich wartości momentów zginających i kombinacji obliczeniowej oraz nieczęstej. Weryfikowano stan graniczny nośności oraz stan granicznego rozwarości rys w przekroju przęsłowym i podporowym, a uzyskane wyniki adaptowano na pozostałe części przekroju poprzecznego. Schemat zbrojenia płyty pomostowej ilustruje rys. 172 (str. 275).

Zbrojenie dźwigarów wyznaczono na podstawie analizy stanu granicznego nośności ze względu na zginanie z udziałem siły osiowej oraz ścinania ze skręcaniem. Wyznaczone zbrojenie stanowi część szkieletu zbrojeniowego ustroju nośnego. Zbrojenie podłużne stanowią pręty dolne i górne, w obrębie szerokości dźwigarów, oraz pręty rozmieszczone po ich obwodzie przyjęte ze względu na skręcanie. Oszacowano także masę zbrojenia podłużnego wsporników oraz przęsłowej części płyty pomostowej. Schemat zbrojenia podłużnego dźwigarów górnej i dolnej warstwy ilustruje rys. 175 (str. 270).

Przekroje, analizowane bezpośrednio w procedurze doboru sprężenia, zweryfikowano metodą nośności granicznej, opisaną na początku rozdziału 5, przyjmując wyznaczone wcześniej charakterystyki oraz położenie cięgien sprężających w przekroju. Zbrojenie konstrukcyjne, uwzględniane podczas sprawdzania warunku nośności, przyjmowano jako minimalne lub zwiększano je stopniowo aż do momentu uzyskania niezbędnej nośności.

Zbrojenie podporowe, wyróżnione na rys. 175, przyjęto wprost jako 15% zbrojenia dolnego środkowej części przęsła, lecz nie mniej niż zbrojenie minimalne.

Szkielet zbrojeniowy dźwigarów uzupełniono zbrojeniem podłużnym i strzemionami po weryfikacji ze względu na ścinanie ze skręcaniem.

Przewidziano analizę układów sił wewnętrznych z maksymalną, co do wartości bezwzględnej, siłą poprzeczną (rys. 177, str. 279) i maksymalnym, co do wartości bezwzględnej, momentem skręcającym (rys. 178, str. 280). Każdy układ analizowano z odpowiadającym sobie zestawem sił towarzyszących.

Algorytm doboru zbrojenia poprzecznego weryfikuje wszystkie, wydzielone na długości modelu rusztowego, przekroje różnicując intensywność zbrojenia w zależności od wielkości działających w nim sił.

Ostatecznie przyjmowana w analizie kosztu ilość zbrojenia odpowiada minimalnej wartości wyznaczonej przy założeniu kąta pochylenia ściskanych krzyżulców betonowych z zakresu $\theta \in \langle 1,000, 2,000 \rangle$.

Obok doboru zbrojenia przewidziano także weryfikację nośności ściskanych krzyżulców betonowych z uwzględnieniem interakcji sił poprzecznych i skręcania

Reasumując, w rozdziale 5. Zawarto opisy praktycznego wdrożenia niezbędnego do odpowiedzi na postawione we wstępie pracy pytania (cel główny pracy). Szczegółowo opisany system optymalizacji składa się z kilku powiązanych ze sobą modułów wraz z definicją problemu optymalizacyjnego.

W rozdziale 6 (*Wyniki analizy optymalizacyjnej*) przytoczono i skomentowano wyniki wykonanych analiz oraz czasy trwania wybranych obliczeń, scharakteryzowanego w poprzednim rozdziale systemu optymalizacyjnego. Przedstawiono efekty działania systemu optymalizacyjnego w kontekście doboru sprężenia i minimalizacji funkcji celu - kosztu obiektu. Poprawność działania poszczególnych modułów systemu przedstawiono na przykładzie geometrii rzeczywistego (znanego) przekroju poprzecznego ustroju nośnego i dopasowanego do niego otoczenia. Analizowano dwuprzęsłowy (32,00 + 32,00m), dwubelkowy, kablobetonowy wiadukt drogowy o przekroju poprzecznym zobrazowanym na rys. 179 (str. 284). Poziom odniesienia, jako rozwiązanie porównawcze, pełni model BIM i związane z nim otoczenie przywołanego wiaduktu.

Przytoczono wyniki obliczeń modułu doboru parametrów sprężenia, umożliwiające wyodrębnienie danych niezbędnych do poprawnego zaprojektowania sprężenia, oraz raporty prezentujące poszczególne kroki procesu optymalizacyjnego.

Przykładowe wyniki analiz dotyczące porównania wartości momentów ze zbioru testowego z prognozowanymi przez sieć neuronową zamieszczono w tab. 46 (str. 285-286). Tab. 47 (str. 293-295) zawiera wyniki dotyczące ewolucji populacji rozwiązań otrzymanych podczas działania algorytmu doboru geometrii ustroju. Wyniki zilustrowano również na rys. 180-190 (str. 287-296).

Przebieg procesu przeszukiwania obszaru rozwiązań układu sprężenia, z doбором geometrii tras i liczby kabli sprężających, które przedstawiają wartości: minimalną, maksymalną oraz średnią zilustrowano na rys. 181-183. Przy czym rys. 181 dotyczy zmian całkowitej masy stali sprężającej w pojedynczym dźwigarze, rys. 181 dotyczy zmian liczby niespełnionych ograniczeń naprężeniowych i geometrycznych, a rys. 182 dotyczy zmian wartości naprężeń w kombinacji częstej, w kolejnych pokoleniach algorytmu genetycznego.

Przebieg i wartości momentów zginających (rys. 184) i obwiednie naprężeń normalnych (rys. 185) w przekrojach kontrolnych od wyznaczonego, zoptymalizowanego układu sprężania, prognozowane przez sieć neuronową, skonfrontowano z wynikami analizy statycznej MES.

Obwiednie naprężeń sporządzono dla kombinacji częstej z uwzględnieniem sprężenia w obu stadiach, $t = 0$ i $t = \infty$. Ewolucję rozwiązań tras ciągów sprężających, w kolejnych pokoleniach algorytmu optymalizacyjnego, przedstawiono na rys. 186.

W końcowej części rozdziału 6. odniesiono się do przebiegu procesu optymalizacyjnego, czasu trwania obliczeń i uzyskiwanych wartości funkcji celu. Podkreślono, że wyjściowy model BIM

powielano i wariantowano w trakcie analizy optymalizacyjnej, stanowiąc niejako centrum obsługiwaną dwukierunkowo wymiany informacji. Polegało to na odczytywaniu danych dotyczących geometrii i ich wizualizacji z jednej strony oraz generowaniu nowych danych z drugiej strony. Nowe dane, w tym zestawienia materiałów i wykonywana na ich podstawie kalkulacja kosztów, miały wpływ na dalszy kierunek analiz optymalizacyjnych.

Proces ewaluacji rozwiązań, w trakcie działania algorytmu doboru geometrii ustroju nośnego, przedstawiono w tab. 47, która, oprócz kształtów przekrojów poprzecznych, zawiera również wartości liczbowe, dotyczące określonych pokoleń rozwiązań, w tym minimalną i maksymalną oraz średnią wartość funkcji kosztu.

Ewolucję rozwiązań, pod względem całkowitego kosztu budowy, przedstawiono na rys. 188. Z kolei na rys. 189 zilustrowano ewolucję wartości składników kosztu, w kolejnych pokoleniach algorytmu genetycznego, dotyczącą objętości betonu ustroju nośnego oraz powierzchni zabezpieczeń antykorozyjnych. Rys. 190 ilustruje ewolucję wartości parametrów geometrycznych, w kolejnych pokoleniach algorytmu genetycznego, dotyczącą odsunięcia poziomego lewego dźwigara (*OL*) oraz szerokość lewego dźwigara (*BL*).

Na zakończenie Doktorant odniósł się wykonanych testów i uzyskanych wyników.

W rozdziale 7 (*Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych badań*) zawarto podsumowanie pracy z określeniem wniosków stanowiących odpowiedzi na przytoczone w początkowej części dysertacji pytania (cele pracy).

Reasumując Doktorant stwierdził, że *celem pracy było przedstawienie zakresu czynności niezbędnych do przeprowadzenia skutecznego procesu optymalizacji określonego typu obiektów mostowych z wykorzystaniem wybranego narzędzia klasy BIM.*

Ponadto stwierdził, że *efektem przeprowadzonych prac jest spójne narzędzie dedykowane analizie optymalizacyjnej płytowo-belkowych obiektów mostowych - dostępne publicznie pod adresem github.com/majasinski/BridgeOpt.*

W końcowej części rozdziału Doktorant jeszcze raz, w syntetycznej formie, przedstawił zakres poszczególnych rozdziałów i wynikających z nich wniosków.

Podstawowym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonych przez Doktoranta analiz jest **potwierdzenie możliwości przeprowadzenia skutecznego procesu optymalizacji wybranego typu konstrukcji mostowej z wykorzystaniem środowiska BIM.** Na tego typu rozwiązania składać musi się jednak tak samo wybór określonego narzędzia tej klasy, rozpoznanie ograniczeń z nim związanych oraz implementacja zewnętrznego kodu źródłowego.

Na zakończenie Doktorant zaproponował kierunki dalszych prac.

W załączniku A (*Formuły obliczeniowe parametrycznej trasy kabla*) zawarto szczegółowy opis algorytmu przeznaczonego do doboru sprzężenia (zbrojenia aktywnego) w płytowo-belkowych ustrojach nośnych obiektów drogowych o schemacie statycznym dwuprzęsłowej belki ciągłej. Algorytm składa się z zestawu funkcji odpowiedzialnych za obliczenia współrzędnych punktów pomocniczych tras ciągłych sprzężających zestawionych w formie podzielonej na sekcje tabeli, spośród których każda zawiera określony ciąg operacji i przetworzeń z obszaru geometrii analitycznej.

2.2. Aktualność tematu

Podjęty temat badań jest zasadny, ważny i aktualny. Tematyka dysertacji mgr inż. Marcina Jasińskiego jest istotna w kontekście intensywnego programu budowy infrastruktury

transportowej w Polsce, w szczególności drogowych obiektów mostowych z betonu sprężonego. Autor wskazał nowe możliwości dotyczące nowoczesnych narzędzi – systemu optymalizacyjnego – uwzględniającego najnowsze światowe rozwiązania z zakresu metodologii BIM, sieci neuronowych, algorytmów genetycznych stosowanych w zakresie oprogramowania inżynierskiego.

2.3. Ocena zakresu pracy

Przyjęty zakres pracy zasługuje na pozytywną ocenę. Doktorant w pierwszej kolejności dokonał obszernego przeglądu dostępnej wiedzy, a następnie zaproponował i zalgorytmizował modułowy system optymalizacyjny. Opracowany wraz z wykonanymi analizami oraz testami **system zawiera nowe, autorskie rozwiązania nie stosowane do tej pory na świecie**. Wykonane testy potwierdziły, między innymi, poprawność predykcji i skuteczność modelu optymalizacyjnego w zakresie doboru geometrii wybranego typu obiektów mostowych z betonu sprężonego jak i układu cięgien sprężających.

2.4. Cel naukowy

Cel naukowy rozprawy dotyczył odpowiedzi na sformułowane w rozdziale 1. pytania (cel zasadniczy) oraz zebranie doświadczeń z dziedziny optymalizacji konstrukcji w celu przeprowadzenia skutecznego procesu optymalizacji wybranego typu obiektów mostowych z zastosowaniem odpowiedniego oprogramowania, w tym oprogramowania klasy BIM jako celu dodatkowego.

Aby zrealizować cele wykonano:

- szczegółowy przegląd kilkuset pozycji bibliograficznych z zakresu, który dotyczy pracy,
- klasyfikację procesów ze względu na zasięg oraz warstwowość, w szczególności w każdej wydzielonej klasie wyróżniono możliwe do zastosowania podejścia dotyczące definiowania funkcji celu, dostępnych metod i algorytmów optymalizacyjnych oraz wdrożenia technicznych aspektów metodologii BIM,
- sformułowano algorytm optymalizacji przebiegu dróg nazwany J^* w oparciu o jedną z metod inspekcji grafów,
- przegląd ponad 800 rzeczywistych rozwiązań projektowych w celu opracowania „sparametryzowanego” przekroju poprzecznego analizowanego typu obiektów mostowych,
- sparametryzowany model BIM przystosowany do analiz optymalizacyjnych,
- zalgorytmizowany, modułowy (moduły: przetwarzania geometrii, analizy statycznej, doboru sprężenia, doboru zbrojenia pasywnego) system optymalizacyjny umożliwiający otrzymanie najkorzystniejszego rozwiązania konstrukcyjnego, w ujęciu funkcji celu,
- procedurę obsługi parametrycznej trasy kabla sprężającego przystosowaną do obsługi algorytmu genetycznego i sieci neuronowej,
- testy wraz z analizą otrzymanych wyników potwierdzające sprawne funkcjonowanie opracowanego systemu,
- trafnie podano kierunki dalszych prac.

Należy stwierdzić, że na podstawie opracowanych algorytmów, wykonanych analiz i uzyskanych wyników zamierzone cele pracy zostały osiągnięte. Opracowane i przetestowane algorytmy, które wraz z opracowaną i przetestowaną metodyką badań i interpretacją wyników zostały publicznie udostępnione.

Za interesujące i istotnie oryginalne elementy należy przede wszystkim uznać:

- klasyfikację procesów ze względu na zasięg oraz warstwowość, w szczególności w każdej wydzielonej klasie wyróżniono możliwe do zastosowania podejścia dotyczące definiowania funkcji celu, dostępnych metod i algorytmów optymalizacyjnych oraz wdrożenia technicznych aspektów metodologii BIM,
- algorytm optymalizacji przebiegu dróg,
- sparametryzowany model BIM przystosowany do analiz optymalizacyjnych,
- zalgorytmizowany, modułowy system optymalizacyjny umożliwiający otrzymanie najkorzystniejszego rozwiązania konstrukcyjnego, w ujęciu zadanej funkcji celu,
- procedurę obsługi parametrycznej trasy kabla sprężającego przystosowaną do obsługi algorytmu genetycznego i sieci neuronowej.

2.5. Układ pracy, opracowanie redakcyjne

Układ pracy zasługuje na ocenę pozytywną. Na uwagę zasługują także starannie i czytelnie wykonane rysunki, w szczególności za pomocą oprogramowania klasy BIM, które obrazują modele geometryczne złożonych konstrukcji mostowych lub ich fragmenty. Praca jest dosyć obszerna i niektóre fragmenty mogą być bez szkody skrócone lub pominięte. W opinii Recenzenta rozdziały 2 i 3, dotyczące szeroko pojętego przeglądu bibliografii, są zbyt obszerne (zajmują prawie 100 stron). Edycja pracy wymaga jednak jeszcze dopracowania, a niektóre jej fragmenty uzupełnienia, na przykład rozdział 6.4. *Podsumowanie*.

Niektóre uwagi i spostrzeżenia zamieszczono w następnym rozdziale recenzji. Obszerniejszy spis szczegółowych uwag i spostrzeżeń przesłano Doktorantowi.

3. Ważniejsze uwagi

Uwagi ogólne

W spisie piśmiennictwa dotyczącego książek, czasopism i referatów (227 pozycji, większość pozycji anglojęzycznych) wymieniono 12 pozycji, w tym 1. anglojęzyczna, w których autorem lub współautorem jest Doktorant. Wśród spisu repozytoriów, programów i źródeł internetowych (9 pozycji) umieszczone są dwa autorskie przywołania:

- Jasiński, M.: BridgeOpt, Bridge optimization tool using BIM models. Add-in for Autodesk Revit, github.com/majasinski/BridgeOpt [online] (utworzono: 3 grudnia 2020, dostęp: 3 grudnia 2020),
- Jasiński, M.: Genetic Algorithms for Dynamo, repozytorium internetowe [github.com](https://github.com/majasinski/Evo), github.com/majasinski/Evo [online] (utworzono: 26 czerwca 2019, dostęp: 10 marca 2020), licencja: MIT.

Wykaz skrótów na stronie IV zawiera angielskie „rozwinienia” i przy niektórych skrótach polskie tłumaczenia. Może należałoby zaproponować polskie nazewnictwo we wszystkich skrótach?

Oprócz wykazu skrótów powinien być spis przyjętych nazw lub wyrażen „funkcjonujących” w innych niż mostownictwo dziedzinach i podanie ich wyjaśnień „zbliżonych” do sformułowań „inżynierskich”.

Przykładem niech będzie zdanie ze str. 175 „Pokolenie początkowe, w przypadku gdy katalog pokoleń jest pusty, oznacza się jako zerowe i generuje losowo po kliknięciu ikony [Load Deployment]”. Czy Doktorant mógłby to zdanie „przybliżyć” do nazewnictwa stosowanego w mostownictwie?

Jak należałoby zapisać słowa: „pokolenie”, „mutacja”, „osobnik”, „krzyżowanie” i tym podobne, aby przybliżyły, że chodzi o kolejne „warianty rozwiązań”.

Niektóre zdania są mało zrozumiałe lub są „nieprecyzyjnie” sformułowane. Przykłady: str. 114 „Określony przebieg trasy może zostać poddany modyfikacji i uszczegółowieniu w środowisku Civil 3D.”; str. 252 „Zaburzona geometria ciągów w otoczeniu stref czołowych ustroju – związana z odejściem od trasy wypadkowej celem poprawnego ich zakotwienia”.

W pracy zamieszczono 190 rysunków i 47 tablic. Nie na wszystkich podpisach pod rysunkami podano ich źródło. Należy przypuszczać, że większość rysunków zamieszczonych w pracy zostało wykonane przez Doktoranta. Ale nie ma pewności czy na przykład rysunki: 1, 2, 3, 4, 6, 13 i inne są jego autorstwa.

Brak konsekwencji w numerowaniu wzorów. Nie ponumerowano wszystkich wzorów, jak na przykład na str. 75. Obszerne opisy w obrębie tablic również zawierają wzory bez numeracji, jak na przykład tab. 6 czy 8.

Nie powinno używać się skrótów „Tab.” w nagłówkach tablic a raczej „Tablica”. Opis wierszy i kolumn powinien być również ujednolicony we wszystkich tablicach (z małej lub z dużej litery, typ czcionki).

Autor czasami używa słów lub wyrażeń nieprecyzyjnych, nie pasujących do kontekstu ewentualnie zaczerpniętych z języka potocznego, niekoniecznie technicznego. Przytaczam tylko niektóre: „na bazie”, „bazując”, „silnik obliczeniowy”, „surowy rachunek macierzowy” „z uwagi” – raczej „z powodu”, „minimalizacji podlega” – raczej „jest minimalizowana”, „analizie numerycznej podlega” – raczej „analizowano za pomocą oprogramowania”.

Praca zawiera liczne błędy interpunkcyjne (braki przecinków lub przecinki w nieodpowiednim miejscu). Dostatecznie liczne są również błędy typu zły szyk zdania, brak końcówki wyrazu czy, nieodpowiednia odmiana.

Doktorant potwierdził przydatność systemu optymalizacyjnego, w tym algorytmu *modułu doboru sprzężania*, w zakresie kablobetonowych, dwuprzęsłowych wiaduktów drogowych. Recenzent jest zaintrygowany planami Doktoranta dotyczącymi rozwoju zaproponowanego systemu optymalizacyjnego. Czy analogiczne rozwiązania zostaną opracowane dla obiektów trzy- lub pięcioprzęsłowych i jaki byłoby czas wykonywania odpowiednich obliczeń ?

Uwagi szczegółowe - korektorskie, stylistyczne i inne

Analizując pracę, pomimo jej dużej poprawności merytorycznej i mniejszej edytorskiej, dostrzegłem uchybienia oraz nieścisłości, których wybrane przykłady przedstawiam poniżej (konwencja zapisu: nr strony; nr wiersza(y) od góry; jest; powinno być:

- I; 19 (23); z uwagi; ze względu;
- IV; 35; Global Coordi-nate Sys-tem; Global Coordinate System;
- 1; 5; takim, jak to wprowadzeniem; wprowadzeniem jak i zakończono podsumowaniem;
- 1; 10 (11); modelowanie informacji o budowlach, często z wyróżnieniem obiektów kubaturowych jako modelowanie informacji o budynkach i budowlach; modelowanie informacji o budynkach i budynkach;
- 4; 9; podstawę dalszego wykorzystywania; podstawę do dalszego wykorzystywania;
- 5; 21; ze sobą niosą; niosą ze sobą otwarte formaty zapisu i wymiany danych;
- 9; 2; poszczególnych uczestników procesu; poszczególnych jego uczestników;
- 10; 2 (3); zgromadzonej; zgromadzonych;
- 10; 19; związane integracją branż; związane z integracją branż;
- 11; 24; rozwoju; rozwojem;
- 12; 10; wydzielają; wyróżniają;
- i wiele innych.

Uwagi krytyczne i wątpliwości recenzenta dotyczące pracy, w szczególności usterki stylistyczne, interpunkcyjne i literowe nie wpływają w sposób istotny na wartość merytoryczną rozprawy i pozytywnej jej oceny, ale należałoby ich w przyszłości unikać.

4. Ocena końcowa

Autor wykazał się bardzo dobrym przygotowaniem do prowadzenia samodzielnych prac badawczych, zarówno o charakterze koncepcyjnym, analitycznym jak i praktycznym dotyczącym znajomości oraz obsługi różnych systemów i programów komputerowych, arkuszy kalkulacyjnych, środowisk programistycznych jak również posiadania zdolności zbudowania i przetestowania wielu algorytmów powiązanych w jedną całość. Autor umiejętnie korzystał z możliwości przeszukiwania serwerów ulokowanych w różnych miejscach na świecie w celu pozyskania niezbędnych informacji jak również odpowiedniego do realizacji jego celów oprogramowania. Sam również udostępnił wyniki swoich badań zamieszczając je na wskazanych serwerach.

Doktorant Pan mgr inż. Marcin Jasiński samodzielnie opracował postawione w celu pracy zagadnienia. Posługując się odpowiednią metodyką prawidłowo zrealizował dosyć obszerny program badawczy w zakresie teoretycznym jak i praktycznym.

Sformułowane w recenzji uwagi krytyczne nie obniżają w sposób istotny wartości pracy. Mając powyższe na uwadze stwierdzam, że cele postawione na początku pracy zostały osiągnięte, **wyrażam więc przekonanie**, że rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Jasińskiego pt.: „Modelowanie i optymalizacja wybranego typu obiektów mostowych w środowisku BIM” **spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim** zgodnie z „Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku stanowiąc oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

W związku z tym **stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Jasińskiego do publicznej obrony.**



.....
Dr hab. inż. Wojciech Trochymiak