

Rozszerzone streszczenie (PL)

Tytuł: BIM-based Framework of Bridge Health Monitoring Supported by Immersive and 3D Reconstruction Techniques for Analytical and Asset Model Updates

1. Wprowadzenie

Mosty są kluczowym elementem nowoczesnej infrastruktury, ułatwiającym mobilność towarów i ludzi w różnych regionach geograficznych. Pomimo dużego technologicznego postępu w inżynierii, mosty wciąż pozostają podatne na degradację w miarę upływu czasu, która powodowana jest m.in. takimi czynnikami jak warunki środowiskowe, obciążenia użytkowe czy zmęczenie materiału. Mogą one powodować awarie, które często prowadzą do katastrofalnych skutków od zakłóceń gospodarczych i utrudnień społecznych po ryzyko utraty zdrowia lub nawet życia użytkowników. Niestety, obserwuje się coraz więcej tego typu incydentów i to w najbardziej rozwiniętych krajach, co wynika głównie z dłuższego wieku i intensywności wykorzystania istniejącej tam infrastruktury.

Z tego powodu, właściciele i administracja odpowiedzialna za bezpieczeństwo obiektów mostowych zaczyna dostrzegać potrzebę proaktywnych zasad zarządzania i utrzymania tej wrażliwej części infrastruktury. Mogą w tym pomóc systemy monitorowania stanu technicznego konstrukcji typu SHM (Structural Health Monitoring), które pierwotnie stosowano w urządzeniach mechanicznych (np. przemysł lotniczy i kosmiczny), a teraz są sukcesywnie adaptowane również w obiektach inżynierskich. Przy czym, dodatkowe wykorzystanie najnowszych zdobyczy cyfrowych technologii może nie tylko pomóc uniknąć takich tragedii w przyszłości, ale również usprawnić funkcjonowanie tego typu systemów. Dlatego w niniejszej rozprawie doktorskiej pokazano możliwości, jakie daje w tym obszarze integracja metodyki i modeli BIM (Building Information Modeling), technik rekonstrukcji 3D oraz immersyjnych technologii operujących w środowiska wirtualnej, poszerzonej i mieszanej rzeczywistości VR/AR/MR (Virtual/Augmented/Mixed Reality). Potencjał tych technologii w porównaniu z tradycyjnymi metodami oceny strukturalnej i utrzymania jest zasadniczym motywem podjętych w tej pracy badań, które w dużym stopniu mają charakter interdyscyplinarny i demonstracyjny.

1.1 Cel i założenia pracy

Głównym celem opisywanych tu badań jest zapewnienie podstaw do opracowania immersyjnego, zautomatyzowanego systemu monitorowania stanu technicznego konstrukcji mostu poprzez wykorzystanie modelu informacyjnego budowli typu BIM, urządzeń zgodnych z Internetem rzeczy (IoT, Internet of Things), technologii rzeczywistości wirtualnej i mieszanej (VR/ MR) oraz technik rekonstrukcji 3D (skanowanie laserowe i fotogrametria). Proponowane metody dotyczą automatyzacji systemów monitorowania stanu

mostów z uwzględnieniem ich specyfiki oraz praktycznej adaptacji w branży inżynierii lądowej. Zdefiniowano cztery główne cele rozprawy:

1. Opracowanie zasad zarządzania aktywami mostowymi przy użyciu narzędzi analitycznych i modelowania informacji o mostach zgodnie z metodyką BIM.
2. Propozycja zaawansowanego systemu SHM do monitorowania mostu oraz jego walidacja,
3. Integracja technologii SHM, BIM i IoT w celu inteligentnego monitorowania stanu infrastruktury.
4. Opracowanie nowatorskiej immersyjnej platformy cyfrowego bliźniaka nazwanej IBDTP (Immersive Bridge Digital Twin Platform).

Aby skutecznie osiągnąć wyżej wymienione cele rozpoczęto od kompleksowego przeglądu literatury na temat monitorowania stanu konstrukcji (SHM) mostów. Przegląd ten szczegółowo omawia ewolucję systemów zarządzania mostami (BMS, Bridge Management Systems). W dalszej części omówiono wykorzystanie metodyki BIM oraz możliwość integracji z systemami SHM, podkreślając korzyści w gromadzeniu danych, zarządzaniu i podejmowaniu decyzji utrzymaniowych. Omówiono również wykorzystanie wirtualnej, rozszerzonej i mieszanej rzeczywistości (VR/AR/MR) do wizualizacji koncepcji projektowanych mostów. Zbadano również integrację narzędzi VR/MR z modelami BIM, prowadząc do opracowania nowatorskiej platformy cyfrowego bliźniaka mostu, wykorzystującej na potrzeby monitoringu bezprzewodowe czujniki oparte na technologii IoT.

1.2 Luka badawcza

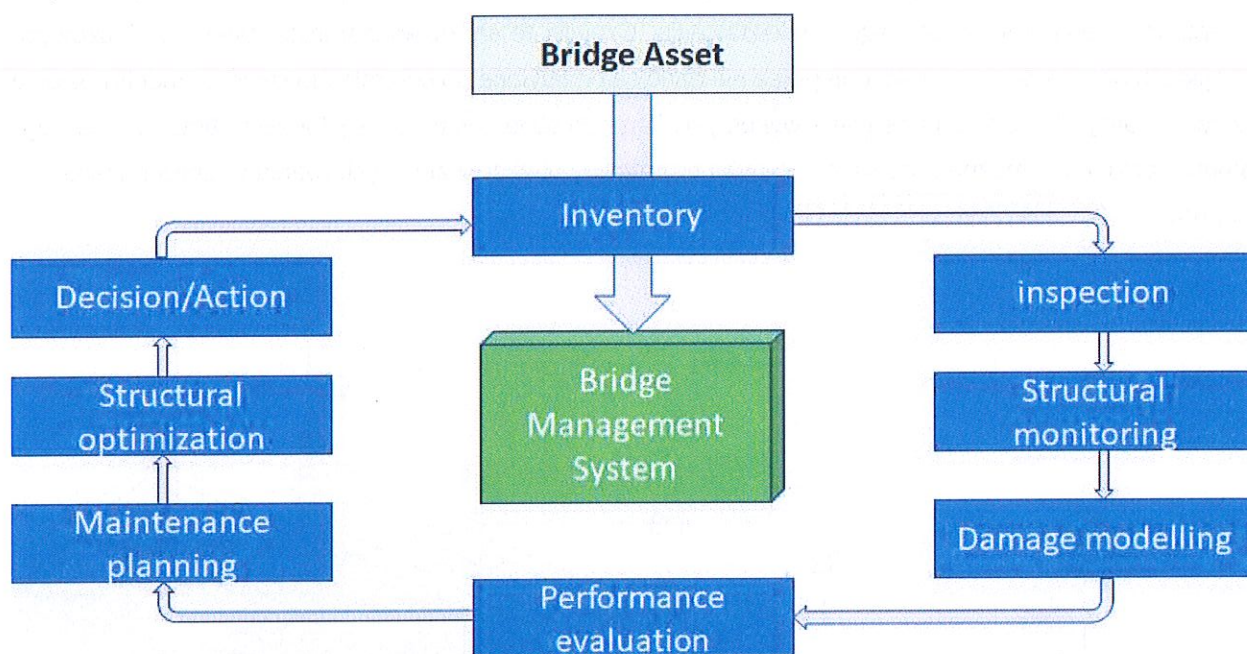
Przegląd literatury wykazał, że najnowsze prace podkreślają wyzwania związane z tradycyjnymi metodami inspekcji i monitorowania mostów, koncentrując się na statycznym gromadzeniu i przetwarzaniu danych. Metodyka BIM i technologie VR/MR w powiązaniu z systemami SHM wyłaniają się jako techniki mogące zautomatyzować generowanie modeli analitycznych, umożliwiając jednocześnie wykrywanie nieprawidłowości strukturalnych w czasie rzeczywistym. Zapewniają one proaktywne przepływy danych dla bezpieczeństwa i niezawodności mostów. Na tej podstawie, w pełni zintegrowany model cyfrowego bliźniaka mostu może zautomatyzować procesy monitorowania, usprawnić podejmowanie autonomicznych decyzji i prowadzenie proaktywnej polityki utrzymaniowej, wspomaganą przez gromadzenie danych w czasie rzeczywistym z czujników zgodnych z IoT. Taka zintegrowana i holistyczna aplikacja nie jest dostępna w obecnym stanie wiedzy. Dlatego też zdecydowano się na opracowanie platformy Immersive Bridge Digital Twin Platform (IBDTP) w celu poprawy zarządzania i monitorowania infrastruktury oraz zaprezentowania jej potencjału w tym zakresie.

2. System zarządzania mostem

System zarządzania mostami (BMS) jest służą do gospodarowania zasobami infrastruktury mostowej w całym cyklu ich życia – podczas projektowania, budowy i eksploatacji [1]. Ponieważ fundusze przeznaczane na utrzymanie infrastruktury stają się coraz mniejsze, administracje drogowe na całym świecie stają przed

wyzwaniami związanymi z rosnącymi wymaganiami w zakresie bezpieczeństwa i starzejących się zasobów infrastruktury. Systemy zarządzania mostami pomagają agencjom osiągnąć ich cele, do których należy m.in. gromadzenie danych ewidencyjnych, tworzenie baz wiedzy z wynikami cyklicznych inspekcji, systematyczne planowanie konserwacji, napraw i rehabilitacji, optymalizacja alokacji zasobów finansowych oraz zwiększenie bezpieczeństwa użytkowników mostów [2][3].

Systemy BMS zostały opracowane, aby pomóc decydentom w maksymalizacji bezpieczeństwa, użyteczności i funkcjonalności mostów w ramach dostępnych budżetów. Istnieją cztery podstawowe elementy BMS uwzględniające cykl życia mostu. Te podstawowe elementy obejmują inwentaryzację aktywów, kontrolę/monitorowanie, ocenę wydajności i podejmowanie decyzji. Wszystkie te elementy obracają się wokół cyklu życia zasobu i pomagają w zarządzaniu wydajnością mostu przez cały okres jego eksploatacji. Wszystkie te elementy zostały zilustrowane na **Rys. 1**.



Rys. 1: Cykl życia systemu zarządzania mostami (BMS)

System BMS stanowi kompleksową skomputeryzowaną strukturę, oferującą wsparcie decyzyjne na etapach projektowania, budowy, eksploatacji i konserwacji infrastruktury mostowej. Jest uznawany za niezbędny do skutecznego utrzymania i trwałego bezpieczeństwa konstrukcji mostowych w dłuższych okresach eksploatacji [4]. Tym samym, BMS odgrywa kluczową rolę w optymalizacji wydajności zarządzania i redukcji niepotrzebnych kosztów związanych z wyzwaniami zarządzania infrastrukturą.

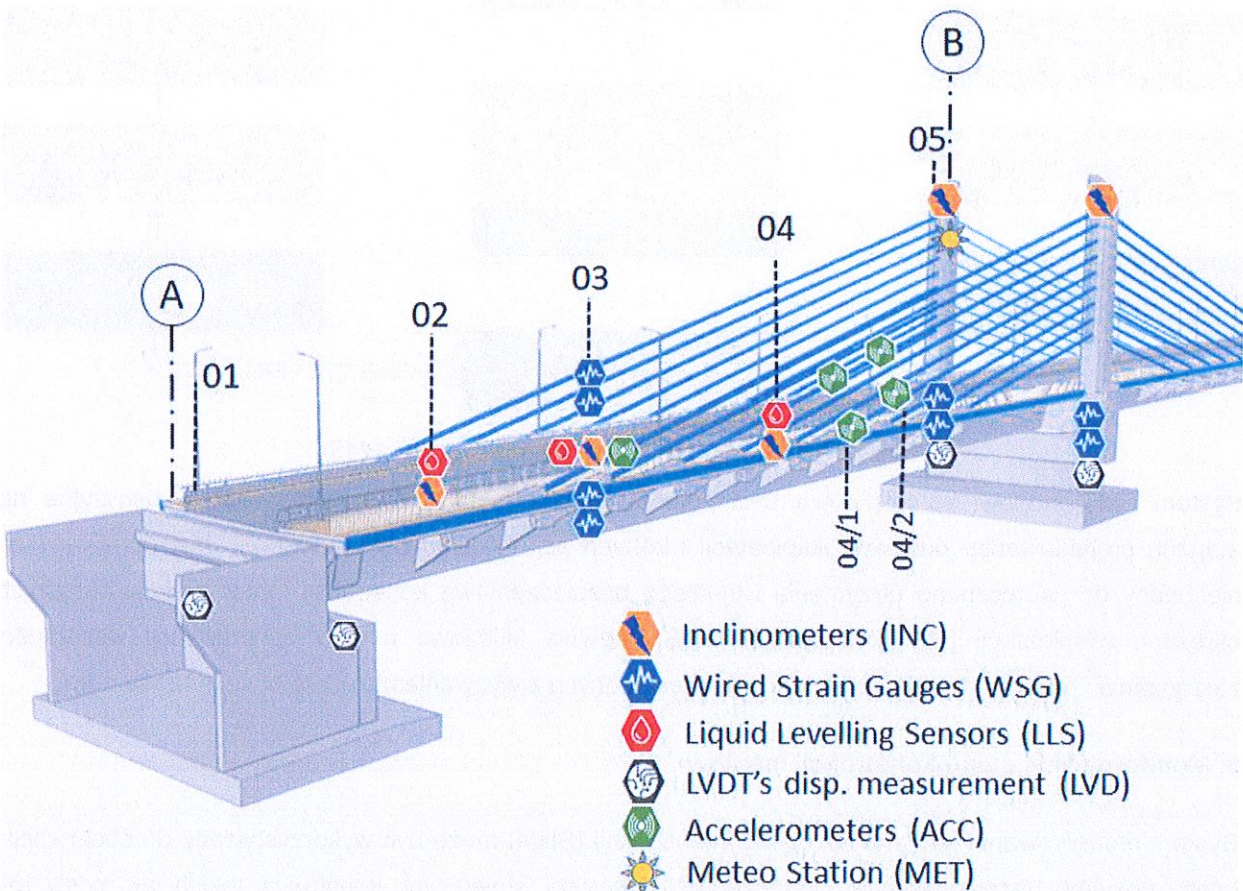
3. Monitorowanie stanu konstrukcji mostów

System monitorowania stanu technicznego konstrukcji (SHM) może być wykorzystywany do obserwacji i oceny poziomu bezpieczeństwa, użyteczności i trwałości istniejących konstrukcji takich jak mosty [5].

Przykładowy układ systemu SHM na moście pokazano na **Rys. 2**. Takie systemy pomagają zidentyfikować pogorszenie stanu technicznego i ewentualne uszkodzenia spowodowane starzeniem się i degradacją konstrukcji. Przyczynami tego mogą być czynniki środowiskowe, błędy projektowe lub wykonawcze, niska jakość konstrukcji, brak odpowiedniej konserwacji oraz klęski żywiołowe, jak trzęsienia ziemi, powódzie lub silne wiatry [6][7]. Coraz większa degradacja mostów wymaga bieżącej oceny konstrukcji, aby dostosować je do oczekiwanych wymagań projektowych i użytkowych [8].

Monitorowanie stanu konstrukcji (SHM) mostów jest od dawna przedmiotem zainteresowania wielu inżynierów i naukowców. W przeszłości prowadzono liczne badania mające na celu ulepszenie tych systemów [6]. W ogólności jest to proces monitorowania i pomiaru odpowiedzi strukturalnej w czasie rzeczywistym w celu wykrycia anomalii we wczesnych stadiach pojawienia się uszkodzeń konstrukcji [9].

System SHM mostów zazwyczaj wymaga użycia czujników, które rejestrują różne parametry, takie jak naprężenie, temperatura, wibracje i odkształcenia. Czujniki te są zazwyczaj instalowane w kluczowych miejscach na moście, a gromadzone przez nie dane są przesyłane do centralnego systemu monitorowania w celu analizy. Dane te są następnie wykorzystywane do stworzenia szczegółowego obrazu aktualnego stanu mostu, który można porównać z danymi historycznymi w celu zidentyfikowania wszelkich zmian lub trendów.



Rys. 2: Przykładowy system SHM zainstalowany na moście

Systemy monitorowania stanu konstrukcji (SHM) przeszły ogromną transformację w stosunku do konwencjonalnych technik monitorowania mostów, które opierały się bardziej na bezpośrednich pomiarach odpowiedzi mostu przy użyciu tradycyjnych czujników na moście. Te konwencjonalne metody obejmują bezpośrednią ocenę stanu konstrukcji przy użyciu technik kontroli wizualnej lub prostych urządzeń ręcznych, takich jak przenośne czujniki. Niemniej jednak metody te wykazują pewne ograniczenia, ponieważ są w dużym stopniu zależne od ręcznej interwencji, powodując kilka kwestii, takich jak czasochłonne procesy, pracochłonność, zaangażowanie zasobów ludzkich i podatność na błędy oraz kwestionowana kwantyfikacja mierzonych danych [10]. Ponadto brakuje im kompleksowości i szczegółowej oceny uszkodzeń w kontekście postępu w monitorowaniu mostów. Biorąc pod uwagę te ograniczenia, coraz częściej wprowadza się zaawansowane cyfrowo czujniki, takie jak przewodowe tensometry, czujniki światłowodowe, czujniki przyspieszenia, przetworniki piezoelektryczne i czujniki poziomowania cieczy w celu dokładnego i szybkiego monitorowania stanu mostu [11]. Jednak nawet system wykorzystujący tak zaawansowane rozwiązania ma ograniczenia w zakresie zarządzania danymi i wizualizacji 3D defektów strukturalnych w czasie rzeczywistym.

4. Metodyka BIM i inne technologie cyfrowe do monitorowania i zarządzania mostami

Metodyka BIM to inteligentne i skuteczne narzędzie wykorzystywane do modelowania i zarządzania informacjami o obiektach budowlanych. Wielowymiarowe modele BIM tworzone są przy użyciu określonego oprogramowania i mogą być wykorzystane również w zarządzaniu zasobami infrastruktury w całym cyklu życia. Obecnie podejście BIM koncentruje się głównie na modelowaniu geometrycznym 3D na etapie projektowania, dlatego też jest zwykle określane jako modelowanie informacji o budynku. Jednak BIM to znacznie więcej niż tylko narzędzie do projektowania. Jest to proces współpracy, który obejmuje generowanie i zarządzanie cyfrowymi reprezentacjami fizycznych i funkcjonalnych cech obiektu budowlanego. Te cyfrowe modele są wykorzystywane do podejmowania decyzji w całym cyklu życia inwestycji budowlanej.

W podlegającym cyfryzacji świecie, procesowi tej transformacji podlegają już nie tylko dane opisujące obiekty mostowe na sieci infrastruktury, ale również towarzyszące im procesy, które dotychczas miały charakter jedynie fizyczny. Zmiana ta wynika z wymagań zarządców obiektów oraz potrzeby zapewnienia bezpieczeństwa i komfortu użytkowników. Wymusza to łączność i integrację w bardziej synchronicznym wymiarze cyfrowym, zwłaszcza w zakresie pozyskiwania, przetwarzania i udostępniania danych oraz podejmowania decyzji, a potem uruchamiania i nadzorowania procedur. System zarządzania mostami umożliwi obecnie współpracę mostów z innymi obiektami w celu wzmocnienia globalnego, całościowego zarządzania i tworzenia cyfrowych sieci inteligentnej infrastruktury (smart infrastructure). Aby to umożliwić, potrzebny jest wielobranżowy paradygmat, który uwzględni adaptację modeli i metodyki BIM w systemach BMS.

W ostatnich latach BIM stał się najbardziej rozwijającą się technologią w branży budowlanej i został rozszerzony również na obiekty infrastruktury. Metodą tą jest obiecującym podejściem, które można wykorzystać do projektowania, budowy i zarządzania obiektami mostowymi, w którym cyfrowa reprezentacja procesu budowlanego jest wykorzystywana do usprawnienia wymiany i interoperacyjności informacji [12]. Zastosowanie BIM przynosi redukcję kosztów, kontrolę jakości i poprawę wydajności w całym cyklu życia obiektu (inwestycji budowlanej). Badanie [4] przeprowadzone przez Uniwersytet Stanforda podkreśliło potencjalne korzyści płynące z zastosowania narzędzi BIM w projektach budowlanych. Według tego badania, wdrożenie BIM może zredukować blisko 40% zmian w dokumentacji, obniżyć ceny kontraktów o około 10% i skrócić czas trwania projektu o około 7%. Głównie dzięki identyfikacji i rozwiązywaniu kolizji projektowych i wykonawczych. Z tego powodu, tak mocno rozwijają się obecnie nowe komercyjne narzędzia BIM jak Autodesk Revit, ArchiCAD i Allplan [13]. Co więcej, BIM został z powodzeniem również wdrożony w wielu projektach mostowych [14]. Jednak trzeba też zauważyć, że zastosowanie BIM w fazie utrzymania rozpoczęło się stosunkowo późno. McGuire i Atadero wykorzystali BIM do zarządzania inspekcją i oceny informacji [15]. Abudayyeh i Al-Battaineh przyjęli powykonawczy model informacji o moście do konserwacji i zarządzania As-Built Information Model for Bridge Maintenance. Niektóre inne prace badawcze również połączyły BIM z tradycyjnym systemem zarządzania w celu poprawy wydajności utrzymania [16][17][18]. W badaniach tych stwierdzono, że wykorzystanie narzędzi cyfrowych, w szczególności metodyki BIM, umożliwia systemom zarządzania mostami standaryzację i utrzymanie mostów, a także procesy przetwarzania danych dotyczących tych obiektów.

Oprócz BIM, również kilka innych powiązanych technologii daje szansę na usprawnienie procesów zarządzania infrastrukturą. Chodzi tu głównie o programowanie wizualne, sztuczną inteligencję (AI), podejście Scan-to-BIM, rzeczywistość wirtualną, rozszerzoną i mieszaną (VR, AR, MR), Internet rzeczy (IoT) czy koncepcję cyfrowych bliźniaków (DT, Digital Twin). Oferują one nowe możliwości w zakresie gromadzenia i przetwarzania danych, dostępności i trójwymiarowej wizualizacji mostów, które dzięki BIM mogą być zintegrowane z systemami SHM monitorowania ich stanu technicznego. W ten sposób przynoszą one korzyści w procesie podejmowania decyzji predykcyjnych i utrzymaniowych.

Również zastosowanie technik rekonstrukcji 3D (np. skanowanie laserowe i fotogrametria) ułatwić może gromadzenie i integrację danych dotyczące stanu mostów w środowiskach BIM. Dzięki temu możliwe jest wykrywanie w czasie niemal rzeczywistym nieprawidłowości strukturalnych i deformacji. Potencjał technik rekonstrukcji 3D i modeli BIM odgrywa jeszcze większą rolę, gdy wprowadzi się dodatkową integrację z systemami SHM, co stanowi właściwie pierwszy krok w kierunku cyfrowego bliźniaka mostu (DT). Tworzy się w ten sposób więź między wirtualnym modelem mostu a fizycznym obiektem, który wyposażonym jest w czujniki IoT do monitorowania. Wykorzystując dwukierunkową wymianę danych między modelami fizycznymi i wirtualnymi. Umożliwia to monitorowanie w czasie rzeczywistym, szybkie wykrywanie anomalii i proaktywną konserwację zasobów mostu. W konsekwencji prowadzić to będzie do optymalizacji wydajności zasobów infrastruktury.

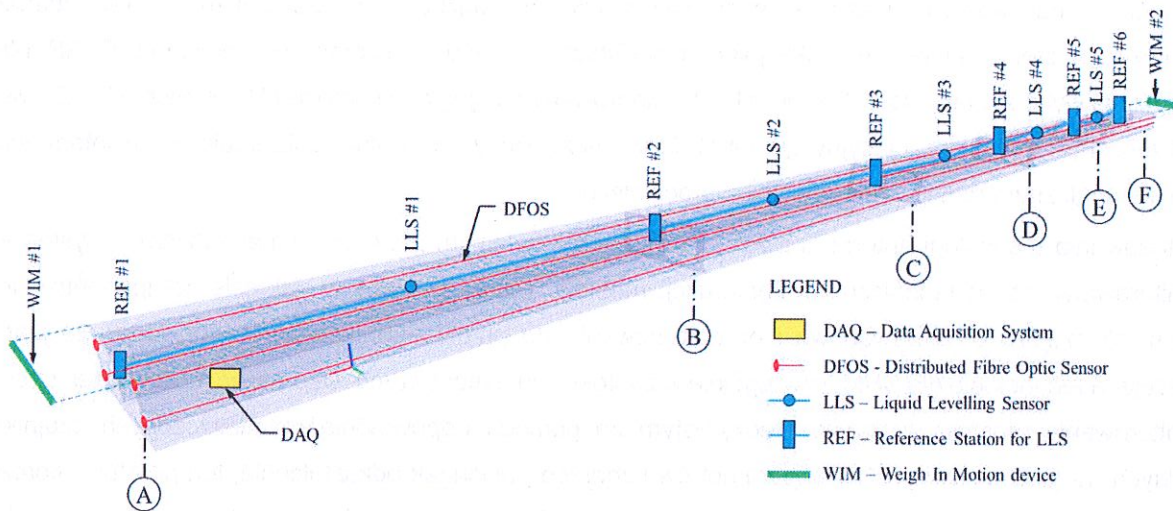
Aby ocenić możliwości poprawy percepcji użytkownika w związku z wdrażaniem modeli DT, zbadano również technologie immersyjne, takie jak rzeczywistość wirtualna, rozszerzona i mieszana (VR, AR, MR). W tym celu wykorzystano kask Trimble XR10 zintegrowanym z goglami Microsoft HoloLens (HL), Zawiera on inteligentny pulpit nawigacyjny typu MR, który może służyć do pozyskania intuicyjnych informacji o stanie technicznym mostu w immersyjnym środowisku.

Zastosowania technologii Internetu rzeczy (IoT) stał się kolejnym przydatnym narzędziem w systemach monitorowania stanu technicznego konstrukcji mostów. Ciągłe postępy w zakresie komponentów IoT, takich jak czujniki bezprzewodowe i oprogramowania do przetwarzania danych, sprawiają, że jest to obiecująca technologia dla SHM, szczególnie w zastosowania mostowych. Usprawnić można w ten sposób monitorowanie mostów w czasie rzeczywistym za pomocą odpowiednio rozmieszczonych czujników zdolnych do gromadzenia różnych parametrów i zdarzeń, takich jak odkształcenia, temperatura, korozja, pękanie, zmęczenie i wibracje. Kompletny zestaw czujników bezprzewodowych zawiera węzeł czujnika i mikrokontroler, który przekazuje aktualny stan do jednostki zarządzającej w celu podjęcia natychmiastowych działań, zapewniając ciągłe monitorowanie stanu mostu i integralności strukturalnej. Czujnik jest zintegrowany z platformą internetową za pośrednictwem sieci Wi-Fi, aby ułatwić zdalną transmisję danych. Platforma ta kontroluje gromadzenie i przesyłanie danych w celu ich dalszego przetwarzania. Aby zapewnić stałe zasilanie, można zastosować jednostkę solarną podłączoną do akumulatorów rezerwowych.

5. Analityczne modelowanie 3D mostów w celu oceny wpływu uszkodzeń i propozycji systemu SHM

5.1 Studium przypadku uszkodzonego mostu RC na Węgrzech

Początkowych etapy rozwoju możliwości obliczeniowych komputerów oraz ograniczone metody wirtualizacji przestrzeni zmusiły do wprowadzenia wielu uproszczeń w modelowaniu konstrukcji, zwłaszcza w odwzorowywaniu geometrii mostów. Początkowo do tych analiz stosowano metodę sił lub przemieszczeń, ale z czasem wprowadzono również metodę elementów skończonych (MES), która lepiej nadawała się do tworzenia algorytmów i procedur obliczeniowych przy użyciu szybszych i bardziej pojemnych w pamięć komputerów. Takie metody obejmują część analityczną składającą się z oddzielnego, trójwymiarowego prymitywu, który reprezentuje element obliczeniowy i właściwości obiektu potrzebne do analizy. Jednak metoda ta często zawiera niedokładności geometryczne i wymaga interwencji użytkownika. Aby przezwyciężyć te ograniczenia, wprowadzono pewne dodatkowe narzędzia do modelowania analitycznego. Narzędzia te wspierają tworzenie systemów konstrukcyjnych, kompletnych modeli małych i średnich konstrukcji mostowych, dają elastyczność w tworzeniu modeli mostów o nietypowej geometrii i złożonych systemach konstrukcyjnych, parametryzując geometrii modelu oraz wykrywanie kolizji i niedokładności geometrycznych.



Rys. 4. Lokalizacja podstawowych elementów systemu SHM

Podjęte w pracy badania wykorzystują narzędzia modelowania analitycznego do oceny wpływu uszkodzeń i do projektowania systemów monitorowania mostów. W tym celu, w rozprawie zbadano dwa studia przypadków. W pierwszym rozważany był uszkodzony most żelbetowy będący jednocześnie koroną zapory wodnej na Węgrzech. Do analizy istniejącego stanu mostu wykorzystano metody analityczne, a na podstawie wyników analizy zaproponowano system SHM do monitorowania mostu. Proponowany system SHM pokazano na Rys. 4. Wyniki przeprowadzonej analizy dają następujące obserwacje:

- Potwierdziło się występowanie niedopuszczalnych rys żelbetowej konstrukcji (limit wg EC wynosi 0,3 mm). Zmierzone rozwartości przekraczały 0,4 mm. Podstawowa analiza statyczna wykazała możliwość pojawienia się rys 1,5 mm, a w przypadku analizy nieliniowej było to 0,6 mm.
- Duże amplitudy zmian temperatury i wilgotności powodują przyspieszone pęknięcie i starzenie się betonu.
- Zaobserwowano rozległą korozję prętów stalowych, co wynika z małej otuliny betonowej.
- Ugięcie mostu obserwuje się w strefie bezpiecznej. Obliczone wg analizy statycznej wynosi 6 mm, a w przypadku analizy nieliniowej 20 mm. Jest więc poniżej dopuszczalnego ugięcia, które wynosi 69 mm.
- Nośność mostu na zginanie i ścinanie w stanie granicznym nośności oraz naprężenia w stanie granicznym użyteczności spełniają kryteria zgodnie z wytycznymi EC.

Widać, że powyższe wyniki są lepiej zbliżone do pomierzonych in-situ w terenie w przypadku zastosowania analizy nieliniowej 3D. Dlatego też zaleca się stosowanie tego typu analiz do oceny uszkodzeń i aktualnej nośności użytkowej mostów. Oprócz tego, w celu monitorowania propagacji istniejących uszkodzeń i zapewnienia dalszej bezpieczniejszej eksploatacji mostu, zaproponowano system SHM. System ten obejmuje instalację czujnika poziomowania cieczy (LLS) do pomiaru przemieszczenia pionowego, rozproszonych czujników światłowodowych (DFOS) do monitorowania deformacji oraz urządzeń Weigh in Motion do monitorowania ruchomych obciążeń na moście. Przy projektowaniu tego systemu przyjęto następującym założenia:

- System będzie działał przez 15 lat i zaalarmuje zarządcę w przypadku zaobserwowania nagłego obniżenia nośności.
- Ograniczenie masy pojazdów (do 300 kN) i prędkości (do 30 km/h) wymuszają monitorowanie przejeżdżających pojazdów i wprowadzenie urządzeń typu Weigh in Motion.
- Na moście zostanie wprowadzony ruch wahadłowy na szerokości jednego pasa.
- Wraz z systemem SHM należy wykonać prace zabezpieczające, w szczególności zabezpieczenie antykorozyjne odsłoniętego zbrojenia i iniekcję wskazanych pęknięć.

Choć zaproponowana koncepcja systemu monitorowania SHM pozwoliłaby na wydłużenie cyklu życia tej przeciążonej konstrukcji (oczywiście przy zapewnieniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa), to niestety właściciel mostu nie zdecydował się na takie rozwiązanie. W związku z tym do kontynuacji badań konieczne było znalezienie innego poligonu doświadczalnego.

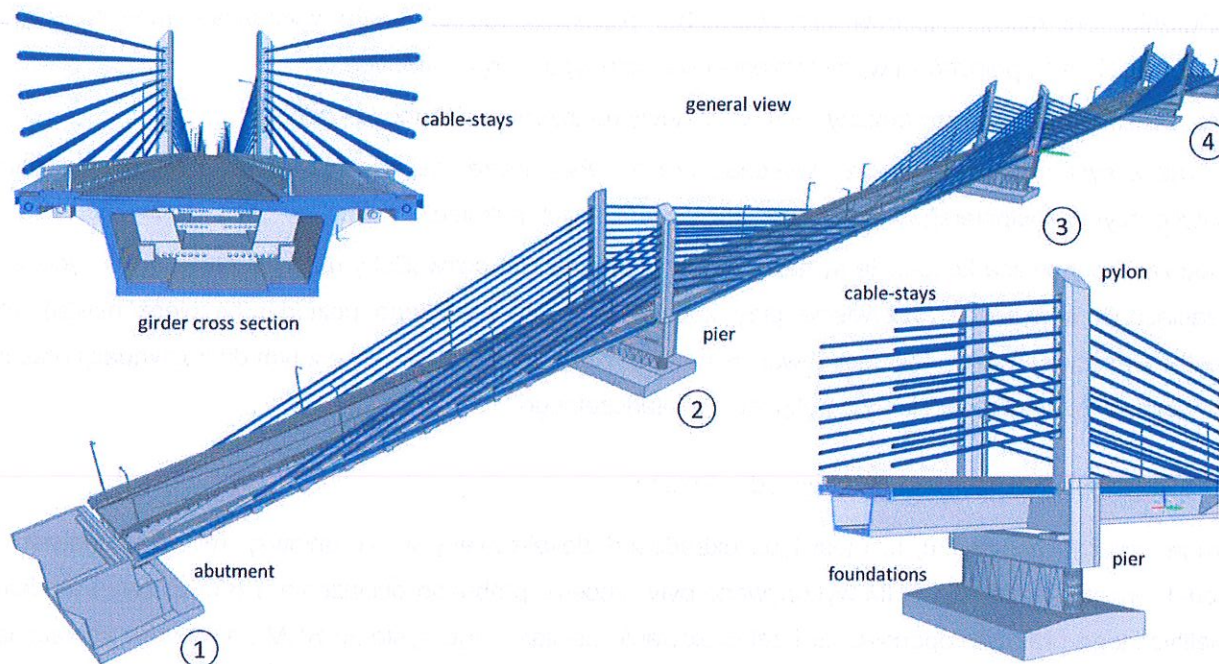
5.2 Studium przypadku mostu extradosed w Polsce

Drugie studium przypadku, to most typu extradosed zlokalizowany w południowej Polsce. Aktualizacja modelu mostu i kalibracja SHM wykonywane były w procesie próbnego obciążenia. Po utworzeniu modelu analitycznego oraz zaproponowaniu i zainstalowaniu powiązanego systemu SHM na moście, konieczna jest weryfikacja wygenerowanych modeli analitycznych i kalibracji zainstalowanego systemu SHM. W tym celu zastosowano badania mostu pod próbnym obciążeniem statycznym oraz dodatkowe próby dynamiczne. Studium tego przypadku służy do pokazania sposobu zautomatyzowanego generowania modelu MES mostu oraz projektowania systemu SHM z testem obciążeniowym, który można wykorzystać do aktualizacji modelu, a tym samym potraktować jako symboliczny proces narodzin cyfrowego bliźniaka.

Styczne testy obciążeniowe pomogły w walidacji modelu MES poprzez porównanie wyników testów terenowych z wynikami numerycznymi. Wyniki te zostały również porównane z normowymi wartościami dopuszczalnymi w zakresie osiadań podpór oraz ugięć sprężystych i trwałych przęseł [19]. Ponadto sprawdzono również spójność wartości sztywności, które również mieściły się w zakresie wyników modelowania MES. Wyniki testów obciążeniowych potwierdziły, że poprawność opracowanego modelu MES i pokazały, że nie było potrzeby jego aktualizacji. Natomiast próby dynamiczne również pomogły w walidacji systemu SHM, przy czym stwierdzono, że brakuje jednak czujników pozwalających na rejestrację drgań. Do jednoznacznej oceny zmian parametrów dynamicznych istniejący system SHM wymaga większej liczby takich urządzeń.

Model BIM mostu został opracowany przy użyciu oprogramowania Autodesk Revit (**Rys. 5**). Wszystkie szczegóły geometryczne zostały ustalone na podstawie archiwalnej dokumentacji. Wszystkie elementy konstrukcyjne, w tym pylony, ciężna podwieszenia typu extradosed, pomost, skrzynkowy dźwigar i przyczółki zostały zamodelowane ze wszystkimi istotnymi szczegółami, a wszystkie właściwości materiałów zostały przypisane zgodnie z dokumentacją wykonawczą. Ponieważ model mostu był dość złożony, instalacja elektryczna i kanalizacyjna nie zostały zamodelowane. Taki rozbudowany model mógłby

potrzebować zbyt wiele pamięci operacyjnej, co mogłoby przekroczyć limity liczby elementów w narzędziach MR.



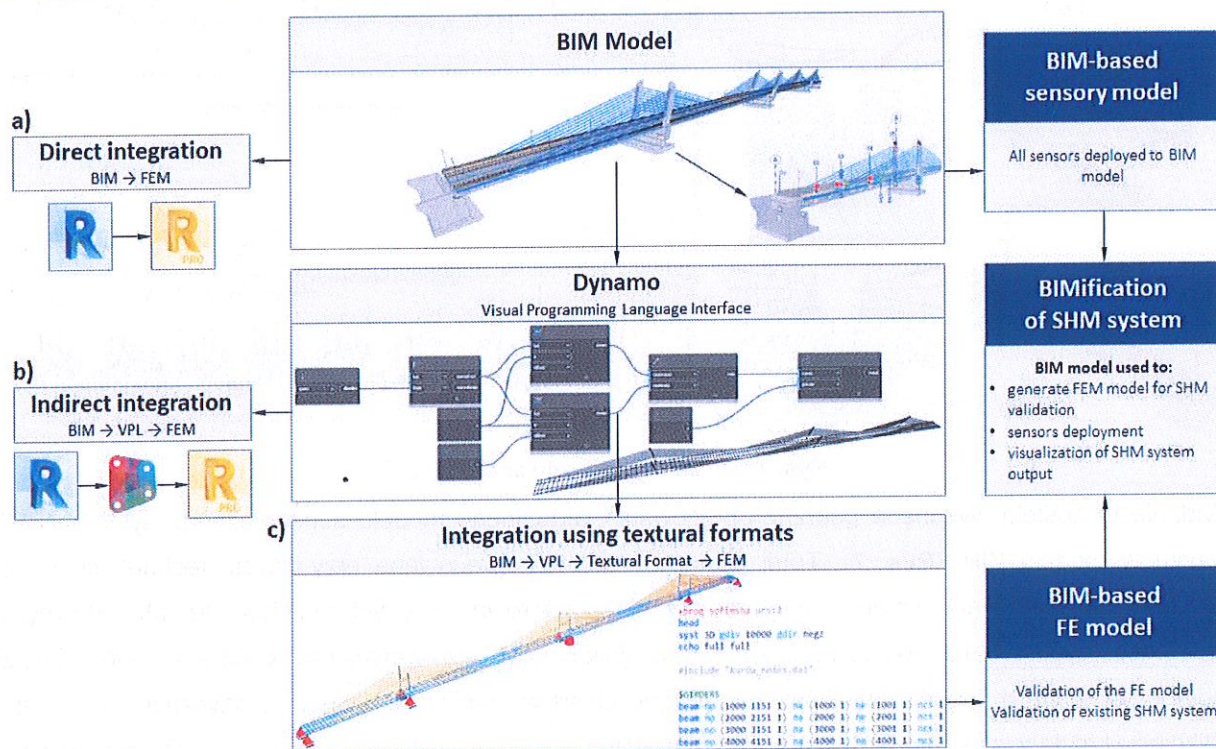
Rys. 5. Model BIM mostu extradosed w Kurowie

Model ten stanowi podstawę dla nowatorskiego rozwiązania zaproponowanego w niniejszych pracy. Rozwiązanie to służy do generowania parametrycznego modelu MES, a także skutecznej wizualizacji danych z czujników w czasie rzeczywistym. Wizualizacja danych SHM jest bardzo przydatna dla inspektorów mostowych, ponieważ mogą oni korzystać z sugerowanej aplikacji podczas inspekcji mostu. Mogą też obserwować stan mostu w czasie rzeczywistym, interpretując na wykresach informacje dostarczane przez czujniki rejestrujące odpowiedź konstrukcji na wpływy zewnętrzne. Integracja między modelami BIM i MES zapewnia spójną bazę danych z możliwością generowania i aktualizowania modeli strukturalnych w sposób półautomatyczny.

Generowanie modelu MES opartego na BIM może odbywać się za pomocą metod bezpośrednich lub pośrednich (Rys. 6). Integracja bezpośrednia (Rys. 6a) obejmuje rozwiązania zamknięte dostarczane przez BIM i oprogramowanie MES. Elementy liniowe, w tym belki, słupy, pylony lub kable, mogą być tłumaczone na odpowiedniki analityczne tworzone automatycznie w środowisku analizy statyczno-wytrzymałościowej. Zauważono, że metoda ta generuje prawidłowe modele tylko wtedy, gdy topologia modeli BIM i MES jest podobna pod względem liczby elementów, ich kształtu, orientacji i relacji. Co więcej, bezpośrednio generowanie modelu strukturalnego wymaga podzielenia modelu BIM na części, w tym elementy, które nie są jawne w rzeczywistej konstrukcji, np. belki podłużne i poprzeczne. Wprowadzenie takiej topologii w środowisku BIM, zwłaszcza do celów analizy strukturalnej, nie jest właściwym podejściem, ponieważ wymaga dodatkowych, oddzielnych i wirtualnych elementów do modelu BIM. Mogą one zakłócać

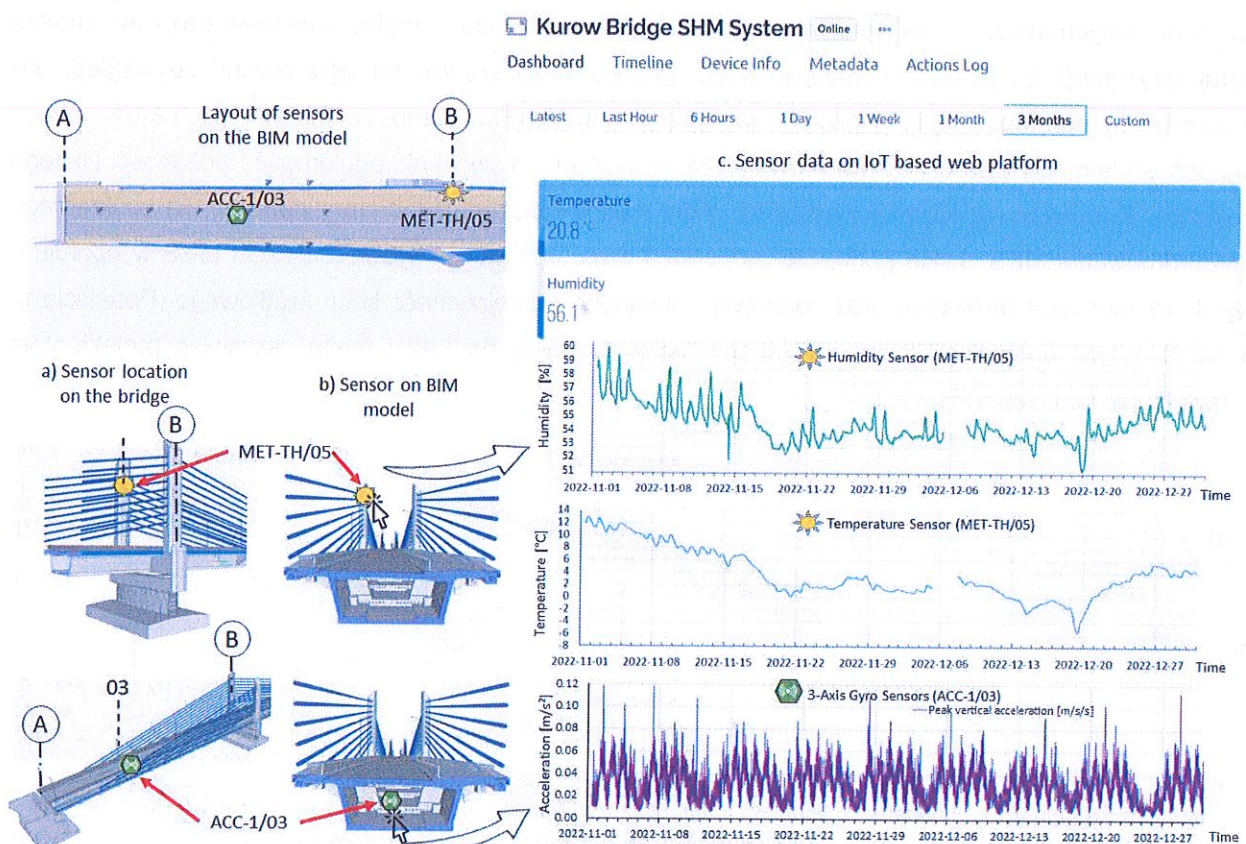
jego semantykę, wydajność i użyteczność w innych aspektach, jak np. w przedmiarach. W związku z tym, w niniejszych badaniach zastosowano tylko metody pośrednie.

W tym podejściu interfejs VPL (tutaj Dynamo) służy do pobierania danych o geometrii przęseł, pylonów i kabli bezpośrednio z modelu BIM i przekształcania ich w zestaw krzywych i punktów, w tym dodatkowych linii dla podłużnych i poprzecznych elementów modelu konstrukcyjnego. Ta reprezentacja geometryczna może być następnie wykorzystana do wygenerowania modeli MES przy użyciu dodatkowych pakietów w Dynamo (**Rys. 6b**) lub formatów teksturowych odczytywanych przez oprogramowanie do analizy strukturalnej (**Rys. 6c**). Za pomocą skryptu wizualnego generowany jest plik zawierający współrzędne wszystkich węzłów. Plik ten jest zapisany w składni języka CADINP używanego w oprogramowaniu MES. Nowatorski skrypt Dynamo generuje ogólną listę współrzędnych węzłów, umożliwiając uniwersalną wymianę danych między środowiskami BIM i MES. Programowanie wizualne umożliwia tworzenie modeli parametrycznych za pomocą otwartego kodu. Metody bezpośrednie są ograniczone ze względu na dojrzałość oprogramowania i niespójności w topologii modelu BIM. W mostowych modelach MES metody bezpośrednie mogą dawać nieprawidłowe wyniki ze względu na swoją nieregularność i złożoność. Dlatego zalecane są otwarte rozwiązania pośrednie, które można rozszerzyć lub zmodyfikować dla konkretnego oprogramowania MES. Takie podejście oszczędza czas, ułatwia aktualizację modelu MES w oparciu o wyniki testów obciążeniowych oraz zachowuje otwartość i przejrzystość kodu źródłowego. Podejście to może stanowić podstawę dla modeli MES mostów opartych na BIM i może usprawnić projektantom prowadzenie obliczeń MES.



Rys. 6. Metody generowania modeli MES na podstawie modelu BIM

Biorąc pod uwagę znaczenie systemów SHM wspomaganych przez IoT, niniejsze badanie połączyło system SHM ze studium przypadku z narzędziami IoT wykorzystującymi platformę BIM. Aby w pełni wykorzystać obiecującą technologię IoT, w niniejszych badaniach wykorzystano nie tylko opracowane platformy IoT, ale także opracowano własny system IoT. System ten obejmował rozwój czujników bezprzewodowych osadzonych w bezpłatnych wersjach platformy internetowej kontrolującej nie tylko czujniki bezprzewodowe zainstalowane jako część systemu SHM, ale także ułatwiającej monitorowanie i zarządzanie danymi w czasie rzeczywistym. Po pomyślnym opracowaniu czujników bezprzewodowych i połączonej platformy internetowej opartej na IoT, system został przetestowany w skali laboratoryjnej dla studium przypadku systemu SHM mostu. W tym badaniu metodyka BIM pełniła rolę łącznikową między systemem SHM mostu a opracowanymi bezprzewodowymi czujnikami opartymi na IoT.

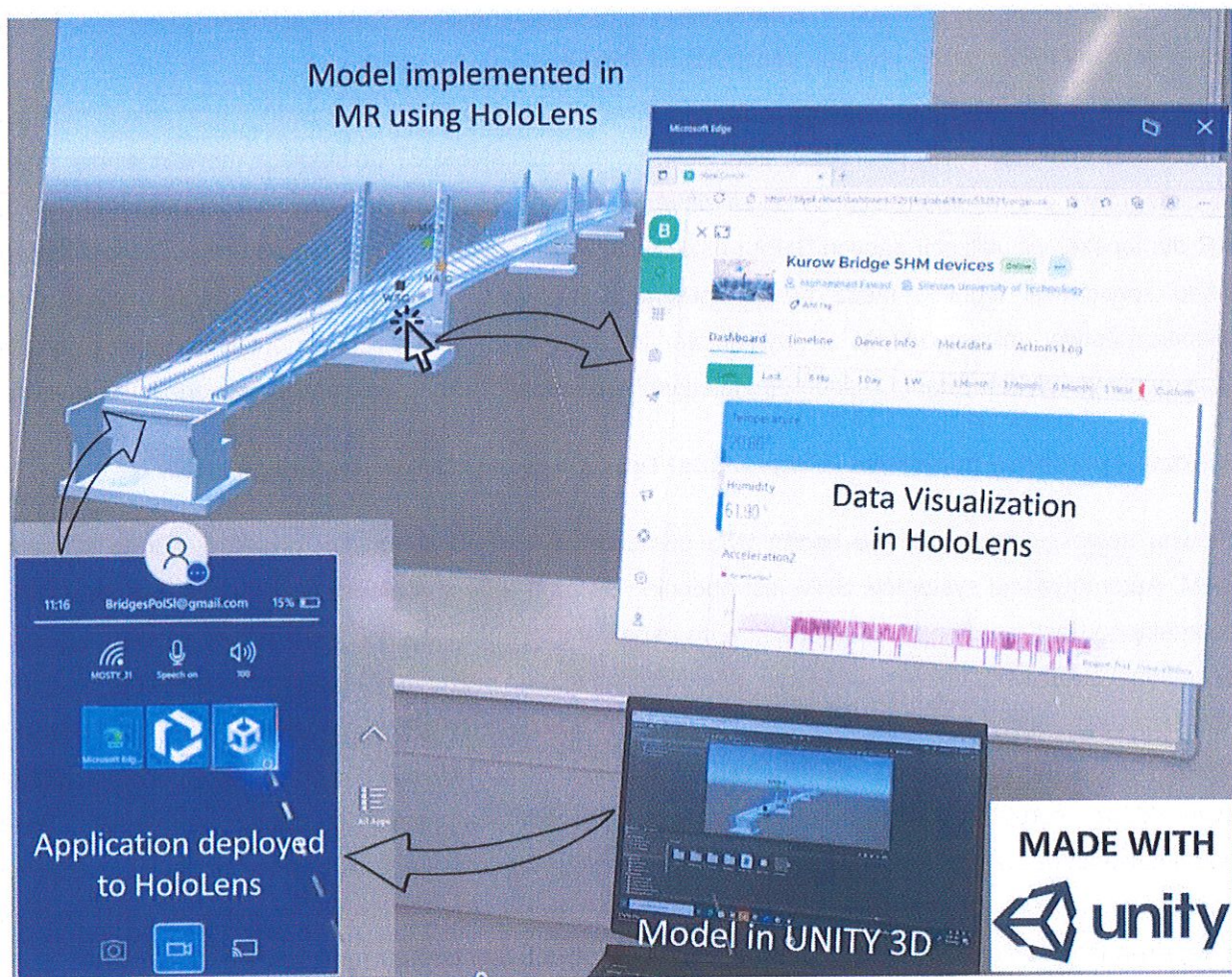


Rys. 7. System SHM mostu oparty na IoT

Zadanie to zostało wykonane poprzez opracowanie wirtualnego modelu sensorycznego systemu SHM mostu w modelu BIM (Rys. 7). Tutaj wszystkie czujniki opracowane przy użyciu technologii IoT są osadzone indywidualnie, a platforma internetowa do monitorowania danych ma charakter interaktywny. W ten sposób system SHM mostu z rzeczywistymi czujnikami zainstalowanymi na moście jest replikowany za pomocą wirtualnych modeli czujników komunikujących się w czasie rzeczywistym z fizycznymi czujnikami. Kliknięcie każdego z nich otwiera platformę internetową, w której wysyłają one dane w czasie rzeczywistym,

co pokazano na **Rys. 7**. Zapewnia to płynną zdalną wizualizację danych, oferując dodatkowe analizy danych potrzebne do ciągłego monitorowania stanu technicznego.

Ponadto, aby efektywnie wykorzystać opracowany system SHM oparty na IoT może być zintegrowany z urządzeniami MR w celu opracowania immersyjnego systemu SHM. To rozwiązanie z MR zwiększa potencjał tradycyjnego systemu SHM wykorzystującego aplikacje MR. Obecnie aplikacje MR w branży budowlanej są wykorzystywane wyłącznie do sterowania maszynami na placach budowy, układania betonu, identyfikacji kolizji oraz zagrożeń bezpieczeństwa pracowników w terenie. Jak dotąd dostępne są bardzo ograniczone badania, które próbują wdrożyć tę technologię w monitorowaniu mostów.



Rys. 8. Wizualizacja danych SHM w goglach HoloLens

Taki immersyjny system SHM obejmuje opracowane bezprzewodowe czujniki IoT, które integrują dane z zainstalowanej sieci czujników w czasie rzeczywistym i przetwarzają je również w czasie rzeczywistym za pośrednictwem platformy internetowej. Integracja danych SHM z urządzeniem MR tworzy płynne połączenie rzeczywistości z wirtualnością. Holograficzne nakładki podkreślają krytyczne obszary, a sterowanie gestami umożliwia zarządzanie danymi online. W ten sposób pomagają wizualizować rejestrowane parametry stanu technicznego mostu za pomocą alertów w czasie zdalnej lub lokalnej

inspekcji. Dzięki integracji z chmurą danych, pozwala na wizualizację wyników, kalibrację systemu i dobór procedur utrzymaniowych w celu zapewnienia dokładności, niezawodności i funkcjonalności systemu. Aby osiągnąć te cele, model VR mostu jest tworzony na podstawie modelu BIM i opracowywany jest model sensoryczny oparty na BIM (osadzony z adresem internetowym platformy IoT). Kliknięcie czujnika otwiera platformę IoT, na której dane w czasie rzeczywistym są stale monitorowane i przechowywane. Dane te mogą być wizualizowane przez określony czas (1 godz., 6 godz., 1 dzień, 1 tydzień i 3 miesiące) (**Rys. 8**). Dane mogą być również przechowywane w pamięci wewnętrznej gogli HL jako plik .CSV, który można następnie przenieść na dowolną stację roboczą. W ten sposób wizualizacja danych SHM może być wykonywana na miejscu lub zdalnie, a dane mogą być przesyłane do zespołu projektowego przez Internet. Schematyczny układ całego procesu pokazano na **Rys. 8**.

Korzystanie z takiego immersyjnego systemu pomaga we wczesnym wykrywaniu uszkodzeń mostów poprzez identyfikację anomalii przez system SHM z siecią czujników IoT do ciągłego monitorowania, które są zintegrowane z modelem BIM. W takim zintegrowanym systemie można już wykorzystać urządzenia MR dla lepszej wizualizacji danych SHM i uszkodzeń mostów w celu zapewnienia całościowego obrazu stanu konstrukcji. Ogólnie rzecz biorąc, integracja ta tworzy kompleksowe podejście, zwiększając bezpieczeństwo, niezawodność i wydajność infrastruktury, jednocześnie optymalizując działania utrzymaniowe i wykorzystanie zasobów do inteligentnego monitorowania stanu technicznego infrastruktury.

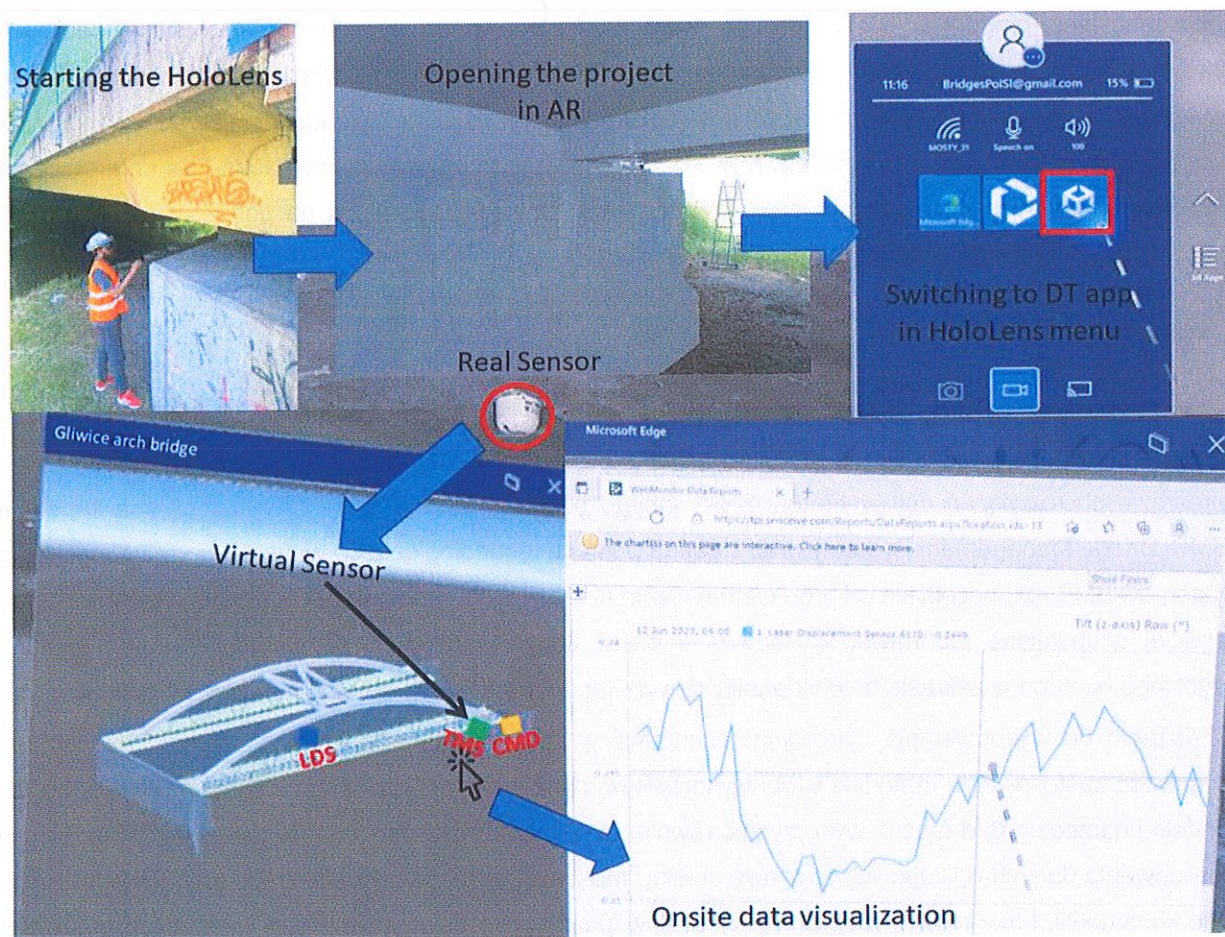
6. Rozwój platformy Immersive Bridge Digital Twin z wykorzystaniem technologii MR i DT

Główną nowością tego zakresu badań było opracowanie immersyjnego zautomatyzowanego systemu SHM. Automatyzacja systemów SHM jest obecnie nowym trendem w monitorowaniu mostów, co wynika ze zdalnego dostępu do nich, ale dodatkowym aspektem tej automatyzacji jest również wizualizacja 3D i ocena danych SHM na obiekcie w terenie. Wykorzystać do tego można technologię MR. Takie wzbogacone rozwiązanie zwiększa potencjał tradycyjnego systemu SHM przez fakt użycia dedykowanej immersyjnej aplikacji MR. Część automatyzacji immersyjnego systemu SHM obejmuje zastosowanie technologii Digital Twin, która oferuje możliwość automatycznego gromadzenia danych z czujników, wspomaganie podejmowania decyzji i proaktywnych działań utrzymaniowych, przy jednoczesnym wsparciu gromadzenia danych w czasie rzeczywistym z czujników IoT. Praktyczne wdrożenie wyników tych badań przeprowadzone było na poligonie doświadczalnym, którym był betonowy most łukowy w Gliwicach.

Niniejsze studium przypadku omawia zastosowane techniki modelowania i wykorzystanie techniki rekonstrukcji 3D (skanowanie laserowe i fotogrametria). Pomagały one w przechwytywaniu i syntetyzowaniu danych przestrzennych w celu opracowania kompleksowego modelu BIM 3D mostu. Niniejsze badanie ma na celu nie tylko zaprezentowanie technicznych zalet rekonstrukcji 3D, ale także podkreślenie jej potencjału do usprawnienia procesu oceny stanu technicznego mostu. Zidentyfikowane w tym procesie uszkodzenia zostały wykorzystywane do analizy przyczyn ich powstania i wpływu na bieżący stan techniczny. Na tej podstawie zaprojektowano i zainstalowano system SHM, który dalej został

połączony z technologiami MR i DT w celu opracowania nowatorskiej platformy Immersive Bridge Digital Twin Platform (IBDTP).

W tym studium przypadku analiza MES jest wykorzystywana do oceny przyczyn stwierdzonego stanu uszkodzenia mostu [20][8]. W związku z tym zaproponowano ograniczony system monitorowania stanu technicznego konstrukcji mostu [21]. System ten obejmował instalację czujników IoT, w tym do pomiaru przemieszczeń szczelin dylatacyjnych, kąta nachylenia punktów pomostu oraz laserowych czujników ugięcia przęsła. Zainstalowano również bezprzewodowy rejestrator z bramką, który działa jako lokalna sieć służąca do transmisji danych. Po zainstalowaniu czujników dane pomiarowe są porównywane z wynikami obliczeń w celu weryfikacji modelu MES. Głównym zaobserwowanym problemem jest wyboczenie stalowych wieszaków. Model MES jest więc dalej wykorzystywany do symulacji przyczyny tego wybożenia, którym okazują się być naprężenia powstałe w wyniku sprężenia dźwigarów pomostu oraz zmiany temperatury dodatkowo zwiększają lub zmniejszają ten efekt.



Rys. 9. Model DT systemu SHM mostu w rzeczywistości mieszanej w postaci platformy IBDTP

Ponadto, przeprowadzone badania pokazują możliwość integracji proponowanego systemu SHM z modelem BIM oraz technologiami IoT i MR, w celu opracowania immersyjnej platformy cyfrowego bliźniaka mostu (Immersive Bridge Digital Twin Platform, IBDTP). Do opracowania IBDTP przyjęto model

geometryczny rzeczywistego mostu bazujący uzyskany w procesie rekonstrukcji 3D i parametrycznym modelowaniu BIM. W celu ciągłego monitorowania stanu mostu zaproponowano system SHM z czujnikami IoT, które tymczasowo zostały zamontowane na moście. Wykorzystano również nowatorski interfejs utworzony w silniku UNITY służącym do programowania gier 3D. Był on wspomagany technologią IoT i został zaimplementowany jako część platformy IBFTP. Platforma może być dostępna również przy użyciu sprzętu zgodnego z technologią MR. W ten sposób powstało immersyjne środowisko decyzyjne dla inspektorów mostowych z płynną komunikacją między wirtualnymi i rzeczywistymi czujnikami. Opracowana platforma IBFTP została pomyślnie przetestowana na prawdziwym moście przy użyciu cyber-fizycznego zestawu MR. Testy platformy w terenie widoczne są na **Rys. 9**. Wyniki pokazują, że dane pomiarowe zebrane i zaprezentowane w platformie IBFTP ułatwiają dostęp zarządców infrastruktury do danych o stanie technicznym mostu z możliwością wizualizacji i oceny uszkodzeń w celu planowania ewentualnych interwencji.

Zaproponowana platforma IBFTP jest nie tylko pionierska w odniesieniu do immersyjnej realizacji cyfrowego bliźniaka z systemem monitoringu SHM mostu, ale także rozwiązuje pewne ograniczenia związane z tradycyjnymi systemami SHM, a w szczególności w zakresie zarządzania i wizualizacji danych pomiarowych w powiązaniu z modelem BIM 3D. Opracowana platforma stanowi podstawę do kreowania przyszłych praktyk wykorzystania i integracji różnych cyfrowych technologii na potrzeby proaktywnych działań utrzymaniowych wśród zarządców infrastruktury.

7. Wnioski

Przeprowadzone badania dostarczyły wiedzy pozyskanej najpierw na podstawie studiów dostępnej literatury na temat monitorowania stanu konstrukcji mostów, od fazy projektowania aż do opracowania immersyjnych rozwiązań dla systemów SHM. Objęto nimi eksplorację systemów zarządzania mostami (BMS, Bridge Management System) wraz z oceną postępu technologicznego w tym zakresie. Eksploracja systemów BMS rozpoczęła się od prób usprawnienia tradycyjnych metod inspekcji mostów, które są coraz częściej uzupełniane lub nawet zastępowane przez dedykowane systemy SHM. Wynika to m.in. z szybkiego postępu w zakresie technik analitycznych, modelowania 3D i cyfryzacji procesów budowlanych. W dążeniu do wykorzystania cyfrowych technologii w systemach zarządzania mostami, zbadano też możliwość zastosowania metodyki BIM i wykorzystywanych w niej modeli informacyjnych. Wykazano, że modele i narzędzia BIM można wykorzystać również w domenie SHM, np. do gromadzenia, zarządzania i analizowania danych opisujących strukturę obiektu mostowego, ale też do rejestracji stanu technicznego jego konstrukcji. I to z możliwością predykcji oraz wsparcia procesów decyzyjnych. W badaniu wykazano zalety metodyki BIM w procesie przekształcania technik modelowania analitycznego konstrukcji mostów poprzez integrację modeli 3D z metodami i narzędziami MES. Integracja taka usprawnia mapowanie nie tylko topologii i parametrów modeli MES, ale również zidentyfikowanych uszkodzeń elementów konstrukcyjnych. W pracy zaproponowano nowatorską technikę zautomatyzowanego modelowania MES

opartego na modelu BIM. W studium przypadku wykorzystany został język programowania graficznego (VPL, Visual Programming Language), który służył do pobierania danych z modelu BIM 3D i konwertowania ich na zestaw krzywych i punktów do automatycznego generowania modelu MES.

W rozprawie przedstawiono również badania nad wykorzystaniem kontinuum rzeczywistości wirtualnej, rozszerzonej i mieszanej (VR/AR/MR). W początkowym etapie była to wizualizacja koncepcji projektowanych mostów, a w toku dalszych prac – również integracja narzędzi VR/MR z systemami SHM konstrukcji. Systemy te uzupełnione zostały przez układy sensoryczne zgodne z wymaganiami technologii Internetu Rzeczy (IoT, Internet of Things). W wyniku tych badań opracowano demonstracyjne rozwiązanie w postaci internetowej platformy systemu SHM obiektu mostowego, która może obsługiwać bezprzewodowe sensory. Dalsza eksploracja tej domeny dostarczyła możliwości integracji technologii mieszanej rzeczywistości (MR) z utworzonym systemem SHM poprzez użycie modelu i elementów metodyki BIM. W ten sposób osiągnięto złożoną integrację kilku zaawansowanych narzędzi i rozwiązań technologicznych, jak SHM, BIM, IoT i MR. W efekcie zaowocowało to utworzeniem nowatorskiej immersyjnej platformy cyfrowego bliźniaka nazwanej tutaj IBDTP (Immersive Bridge Digital Twin Platform). Platforma ta może ułatwić użytkownikowi pracującemu na moście w terenie, korzystanie z wirtualnych i fizycznych zasobów przez użycie immersyjnego środowiska MR. Może także zapewnić mu dostęp do danych rejestrowanych przez system SHM mostu w czasie rzeczywistym.

Docelowo platforma IBTP będzie mogła usprawnić zarządzanie infrastrukturą mostową poprzez przezwyciężenie ograniczeń związanych z tradycyjnymi metodami SHM, a w szczególności w zakresie zarządzania i wizualizacji danych monitorowanego mostu. Opracowany demonstrator zapewnia kompleksowe ramy dla cyfrowego powiązania fizycznego obiektu mostowego z jego cyfrowym odpowiednikiem (cyfrowym bliźniakiem). Nowe funkcje platformy IBTP mogą być potencjalnie skalowane dla różnych typów mostów i infrastruktury krytycznej, oferując poprawę skuteczności tradycyjnych metod inspekcji i pokonanie dotychczasowych ograniczeń w stosowanych obecnie systemach SHM. Rezultaty zrealizowanych badań mają też potencjał do szerszych zastosowań. Chodzi o procesy automatyzacji i wdrażania cyfrowych bliźniaków w całym sektorze budowlanym. Chociaż główny nacisk w rozprawie położono na obiekty mostowe, to należy zaznaczyć, że zdobyte w ten sposób doświadczenia i opracowane metody mogą zostać przeniesione również na inne rodzaje konstrukcji budowlanych.

References

- [1] Mark Hurt, Steven D. Schrock, Bridge Management, in: *Highw. Bridg. Maint. Plan. Sched.*, 2016: pp. 289–310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802069-2.00007-6>.
- [2] G.D. Zhou, T.H. Yi, W.J. Li, J.W. Zhong, G.H. Zhang, Standardization construction and development trend of bridge health monitoring systems in China, *Adv. Bridg. Eng.* 1 (2020) 1–18. <https://doi.org/10.1186/s43251-020-00016-5>.
- [3] A. Miyamoto, K. Kawamura, H. Nakamura, Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges, *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 15 (2000) 45–55. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00170>.
- [4] C. Wan, Z. Zhou, S. Li, Y. Ding, Z. Xu, Z. Yang, Y. Xia, F. Yin, Development of a bridge management system based on the building information modeling technology, *Sustain.* 11 (2019) 1–17. <https://doi.org/10.3390/su11174583>.
- [5] D. Xu, X. Xu, M.C. Forde, A. Caballero, Concrete and steel bridge Structural Health Monitoring—Insight into choices for machine learning applications, *Constr. Build. Mater.* 402 (2023) 132596. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132596>.
- [6] H. Li, J. Ou, The state of the art in structural health monitoring of cable-stayed bridges, *J. Civ. Struct. Heal. Monit.* 6 (2016) 43–67. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0115-x>.
- [7] T. Miyata, H. Yamada, H. Katsuchi, M. Kitagawa, Full-scale measurement of Akashi-Kaikyo Bridge during typhoon, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 90 (2002) 1517–1527. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00267-2](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00267-2).
- [8] M. Fawad, K. Koris, M. Salamak, M. Gerges, L. Bednarski, R. Sienko, Nonlinear modelling of a bridge: A case study-based damage evaluation and proposal of Structural Health Monitoring (SHM) system, *Arch. Civ. Eng.* 68 (2022) 569–584. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.141903>.
- [9] E. Figueiredo, I. Moldovan, M.B. Marques, *Condition Assessment of Bridges: Past, Present and Future*, 2001.
- [10] G.Q. Zhang, B. Wang, J. Li, Y.L. Xu, The application of deep learning in bridge health monitoring: a literature review, *Adv. Bridg. Eng.* 3 (2022). <https://doi.org/10.1186/s43251-022-00078-7>.
- [11] Z. He, W. Li, H. Salehi, H. Zhang, H. Zhou, P. Jiao, Integrated structural health monitoring in bridge engineering, *Autom. Constr.* 136 (2022) 104168. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104168>.
- [12] D. Ilter, E. Ergen, BIM for building refurbishment and maintenance: current status and research directions, 2015. <https://doi.org/10.1108/SS-02-2015-0008>.
- [13] P.N. Martin Hluší, What is BIM and how it came to be, *BIM Tech- Build. Inf. Model.* (2023). <https://bimtech.eu/bim/>.
- [14] Y. Luo, Y. Liu, BIM for bridge design, *IABSE Conf. Guangzhou 2016 Bridg. Struct. Sustain. - Seek. Intell. Solut. - Rep.* (2016) 343–350. <https://doi.org/10.2749/222137816819258654>.
- [15] Brendan McGuire, Rebecca Atadero, Caroline Clevenger, and Mehmet Ozbek, Bridge Information Modeling for Inspection and Evaluation, *ASCE J. Bridg. Eng.* 21 (2016). [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000850](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000850).
- [16] S. Li, Z. Zhang, D. Lin, T. Zhang, L. Han, Development of a BIM-based bridge maintenance system (BMS) for managing defect data, *Sci. Rep.* 13 (2023) 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27924-6>.
- [17] N. Byun, Development of BIM-Based Bridge Maintenance System Considering Maintenance Data Schema and Information System, *Sustainability* 13 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13094858>.

- [18] Z. Zhou, An Intelligent Bridge Management and Maintenance Model Using BIM Technology, *Mob. Inf. Syst.* 2022 (2022). <https://doi.org/10.1155/2022/7130546>.
- [19] D.C. Nguyen, M. Salamak, A. Katunin, M. Gerges, Finite Element Model Updating of RC Bridge Structure with Static Load Testing: A Case Study of Vietnamese ThiThac Bridge in Coastal and Marine Environment, *Sensors* 22 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22228884>.
- [20] B.T. Svendsen, Numerical and experimental studies for damage detection and structural health monitoring of steel bridges, 2021. <https://hdl.handle.net/11250/2978371>.
- [21] M. Fawad, M. Salamak, M.U. Hanif, K. Koris, M. Ahsan, H. Rahman, M. Gerges, M.M. Salah, Integration of bridge health monitoring system with augmented reality application developed using 3D game engine – Case Study, *IEEE Access* 12 (2024) 16963–16974. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3358843>.

