

Nowoczesne technologie w budownictwie

LiDAR, BIM, GIS, AI – wybrane zagadnienia

prof. dr hab. inż. Andrzej Szarata, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Szybki postęp technologiczny sprawia, że coraz chętniej i pewniej sięgamy po nowe dostępne rozwiązania, ułatwiające organizację prac, optymalizację zadań, a także wzrost jakości realizowanych projektów. W przypadku technologii cyfrowych, które znalazły liczne zastosowania w branży budowlanej prym wiodą technologie z pogranicza przestrzennego odwzorowania i zobrazowania danych, wraz z możliwościami rozwijającej się w szybkim tempie sztucznej inteligencji. W ramach niniejszego artykułu przybliżone zostaną o systemy informacji przestrzennej (GIS), technologie BIM, skaniny laserowe (LiDAR) oraz zastosowanie sztucznej inteligencji (AI) w procesie optymalizacji podejmowanych działań.

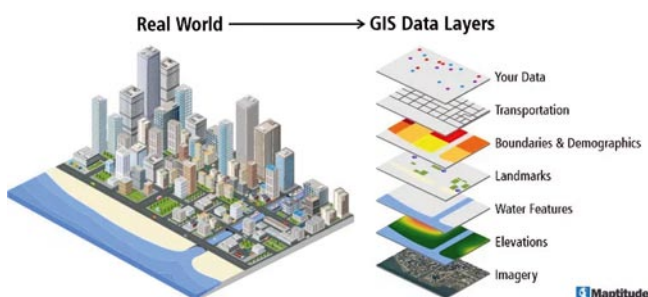
2. Technologie cyfrowe w budownictwie

GIS (ang. *Geographic Information System*) – system informacji przestrzennej, służący do gromadzenia, zarządzania i analizowania danych przestrzennych. GIS łączy w sobie wszelkiego rodzaju dane przestrzenne (lokalizacyjne), pozwalające na określenie kształtów i lokalizacji oraz topologii obiektów wraz z elementami opisowymi (tzw. atrybutami), pozwalającymi na określenie cech ilościowych i jakościowych obiektów. Integracja danych o znanym układzie odniesienia, pozyskanych z różnego rodzaju pomiarów i przetworzonych za pomocą dedykowanego oprogramowania,

z różnorodnymi opracowaniami mapowymi (ortofotomapy, mapy topologiczne, tematyczne, zdjęcia satelitarne) umożliwiają przeprowadzenie licznych analiz i opracowywanie produktów oraz aplikacji dla szerokiego grona odbiorców.

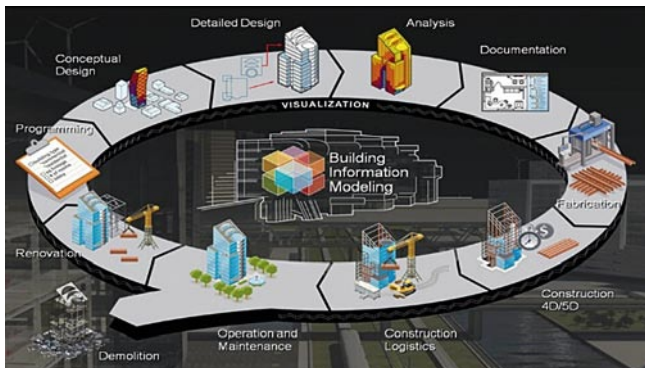
W celu ujednoczenia wytycznych do tworzenia baz danych powstała dyrektywa INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in the European Community*), która od 2007 r. stanowi podstawę do tworzenia baz w jednolitej formie na terenie całej Unii Europejskiej oraz państw EFTA. Opisane w niej środki prawne, techniczne, a także organizacyjne dają możliwość integracji danych z różnych źródeł z uwagi na spójną formę. Lista zastosowań technologii GIS jest imponująca – technologia ta ma ogromną wartość w przypadku planowania przestrzennego (wykonywanie analiz, tworzenie map tematycznych, przygotowywanie dokumentacji), zarządzanie infrastrukturą, wsparcie służby zdrowia, administracji, turystyki i edukacji, a także monitoring wszelkich zmian środowiskowych.

BIM (*Building Information Modeling*) – to w skrócie modelowanie informacji o budynku. Cyfrowy model integrujący informacje geometryczne i opisowe inwestycji, w postaci trójwymiarowego modelu. BIM to stały dostęp do dokumentacji projektowej i planistycznej, harmonogramu, a także możliwość modyfikacji modelu w całym procesie inwestycyjnym. Wdrożenie technologii BIM wymaga zastosowania dedykowanego oprogramowania, którego narzędzia pozwolą na uzupełnienie części opisowej oraz stworzenie modelu 3D od podstaw lub odtworzenie go z chmury punktów 3D (pomiaru laserowego). W kontekście BIM-u warto wspomnieć o tzw. cyfrowym bliźniaku (ang. *Digital Twin*), który stanowi cyfrowe odwzorowanie obiektu ze świata rzeczywistego. Zawarte w nim informacje pozwalają na zarządzanie obiektem w całym cyklu życia, np. poprzez monitorowanie usterek, osiadania, planowanie konserwacji bądź też modernizacji. Pojęcia BIM i Digital Twin nie są tożsame. BIM jako technologia jest



Rys. 1. Składowe danych formatu GIS

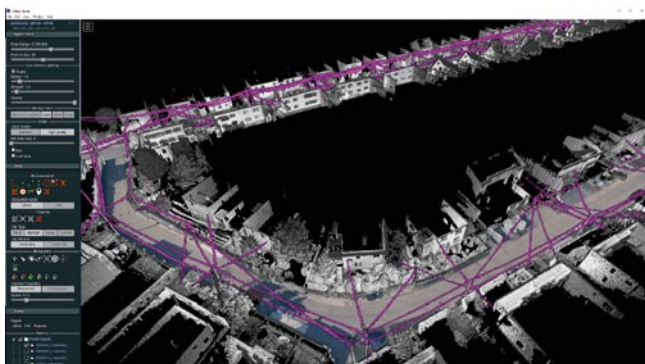
jedynie dopełnieniem cyfrowego bliźniaka, który wymaga dużej liczby danych generowanych w sposób ciągły w trakcie eksploatacji obiektu.



Rys. 2. Cykl życia obiektu – projektowanie BIM [2]

LiDAR (*Light Detection And Ranging*) – tzw. skanowanie laserowe, to technologia umożliwiająca mapowanie przestrzeni w trzech wymiarach poprzez zastosowanie wiązki laserowej. Na podstawie pomiaru czasu jej dotarcia i odbicia od obiektu, jest wyznaczany dystans od sensora. W wyniku pomiarów powstaje tzw. chmura punktów 3D, będąca zbiorem punktów o znanych współrzędnych x, y, z , stanowiących bezpośrednie odniesienie do lokalizacji obiektu w przestrzeni. Skanowanie laserowe jest niezwykle precyzyjną metodą, pozwalającą na osiągnięcie nawet milimetrowej dokładności. Umożliwia również pozyskanie chmur punktów w kolorach RGB oraz podział na klasy obiektów, z rozróżnieniem podłoża, zieleni, budynków, różnego rodzaju obiektów małej architektury lub napowietrznych sieci uzbrojenia terenu. Możliwe jest również nałożenie tekstury bezpośrednio na wygenerowany model 3D. Rozróżniamy trzy rodzaje skaningu laserowego:

- naziemny skanowanie laserowe (stacjonarny) – wykonany przez naziemne skanery montowane na podstawie np. w postaci statywu geodezyjnego;



Rys. 3. Chmura punktów 3D z wyodrębnieniem klasy napowietrznej sieci uzbrojenia terenu [3]



Rys. 4. Model przestrzeni miejskiej w postaci chmury punktów 3D [3]

- lotniczy skanowanie laserowe – skanowanie laserowe, który może być wykonany z pokładu samolotu lub bezzałogowych systemów powietrznych;
- mobilny skanowanie laserowe – wykonywany z przemieszczającego się pojazdu.

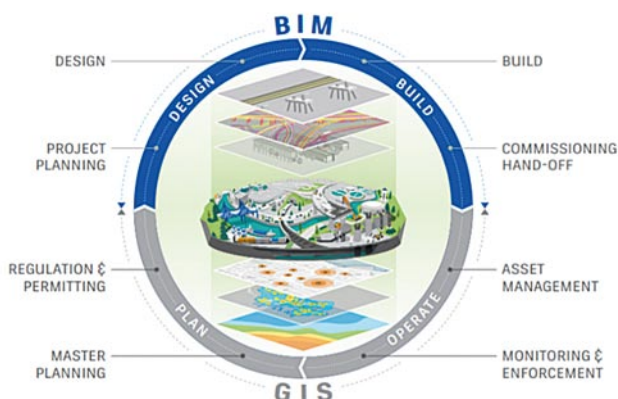
Zastosowań tej metody pomiaru jest wiele: od pomiarów instalacji przemysłowych, identyfikacji wszelkiego rodzaju odchyłek i odkształceń obiektów, po inwentaryzację architektoniczną oraz terenową (pomiar pasa drogowego, obiektów małej architektury, zieleni).

AI (*Artificial Intelligence*) – modele uczenia się, które umożliwiają maszynom optymalizację prac na podstawie wytrenowanych zbiorów danych. Modele „naśladują” pracę ludzkiego mózgu i poprzez odpowiednią liczbę przetworzonych procesów są w stanie rozpoznawać obrazy, wykonywać skomplikowane obliczenia, a także rozwiązywać problemy i przeszukiwać bazy danych. Pojęcie sztucznej inteligencji warto również rozwinąć o uczenie maszynowe i głębokie uczenie maszynowe, które są poddziedzinami sztucznej inteligencji, opartymi na sieciach neuronowych i algorytmach uczenia. Możliwości wykorzystania sztucznej inteligencji w branży budowlanej można szukać już na poziomie planowania kosztorysu i harmonogramu projektów, natomiast w trakcie prac budowlanych AI może okazać się przydatna w momencie podejmowania zakupu materiałów budowlanych i ich dystrybucji.

3. Przenikanie się technologii – powiązania między technologiami na różnych etapach projektu budowlanego

Zastosowań powyższych technologii jest wiele, również w budownictwie. Mogą okazać się niezbędne na różnych etapach procesu budowlanego, czy to na etapie projektowym, realizacyjnym, a także w trakcie eksploatacji zrealizowanej inwestycji. Warto w tym miejscu wspomnieć, że mimo specyfiki każdej z wymienionych technologii,

wszystkie wzajemnie się przenikają i uzupełniają. Połączenie danych 2D (w postaci danych GIS) z trójwymiarowymi modelami BIM lub chmurą punktów 3D pozwala w pełni zrozumieć, opisać i zwizualizować dane z tego samego obszaru. Integracja różnych typów danych, zawierających unikatowe informacje, umożliwia stworzenie dokładniejszego, wartościowego modelu.



Rys. 5. Integracja danych BIM oraz GIS [4]

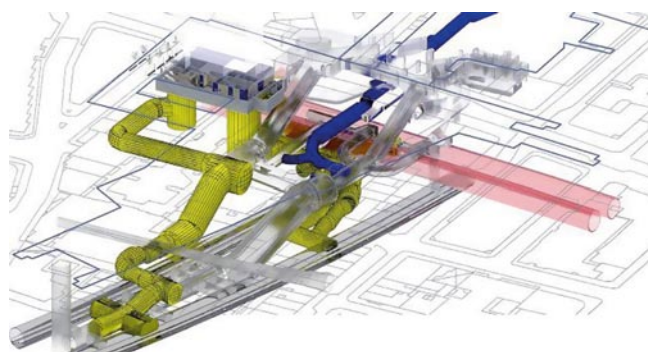
Wykorzystanie cyfrowych technologii daje wiele korzyści nie tylko w sferze zarządzania budową, ale również usprawnia kontakt i przepływ informacji między wszystkimi uczestnikami realizowanej inwestycji. Cyfrowy projekt oraz dokumentacja, a także zastosowanie licznych narzędzi komputerowych umożliwiają szybszą identyfikację napotkanych problemów oraz ich korektę na wczesnym etapie projektowym. Sprzyja temu stały dostęp do danych i czytelna struktura.

Zarządzanie inwestycją budowlaną z wykorzystaniem technologii BIM jest obecnie przedmiotem wielu praktycznych wdrożeń, dla firm będących liderami w tym obszarze w zasadzie naturalnym tokiem postępowania. Jest także przedmiotem badań i prac naukowych. O tym, jak ważne jest to zagadnienie, niech świadczy fakt, że Unia Europejska ogłosiła w 2020 roku szeroki program badawczy Digital Building Twins (RIA) poświęcony właśnie temu zagadnieniu [5], słusznie upatrując ogromnego potencjału ekonomicznego i innowacyjnego dla europejskiego przemysłu budowlanego. Także i wśród twórców i użytkowników metodyki BIM świadomość jej wagi i roli w procesie zarządzania realizacją inwestycji budowlanej była obecna praktycznie od początku, termin BIM interpretowany jako Building Information Management jest stosowany w środowiskach związanych z budownictwem cyfrowym na równi z tradycyjnym jego rozumieniem jako Building Information Modelling [6]. Jest wiele aspektów, w których stosowanie metodyki BIM w realizacji i zarządzaniu

inwestycjami budowlanymi ma ogromne, wręcz przełomowe znaczenie. Można wśród nich wymienić następujące obszary „klasyczne” [7]:

- walidacja możliwości realizacji projektu (*constructability studies*),
- poprawa jakości przedmiarów i kosztorysów,
- poprawa jakości harmonogramów (sekwencjonowanie i planowanie robót),
- łatwa prefabrykacja, w tym indywidualnych komponentów, zwiększenie udziału modelu „realizacji poza placem budowy” (*off-site construction*),
- udoskonalony proces inwentaryzacji powykonawczej i odbiorów.

Przykładów realizacji projektów zarządzanych z wykorzystaniem metodyki BIM i uzyskanych w związku z tym korzyści jest wiele. Dobrym przykładem prawie wszystkich powyżej wymienionych elementów może być sztandarowa inwestycja brytyjskiego mandatu BIM, czyli budowa linii szybkiego metra Crossrail w Londynie. Inwestycja w fazie projektowej w pełni zrealizowana w metodyce BIM (rys. 6), w fazie realizacji – dzięki cyfrowym modelom BIM dla całej inwestycji – pozwoliła na osiągnięcie nie tylko dobrych rezultatów ekonomicznych, jakościowych i środowiskowych, ale stała się wręcz poligonem dla wprowadzania innowacji na każdym kroku.

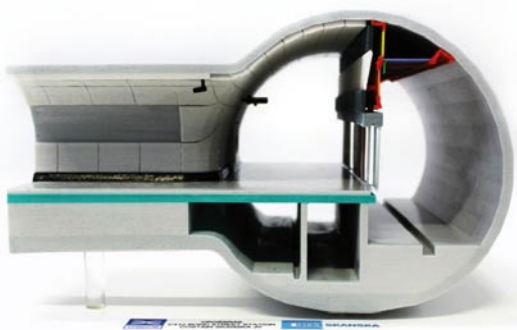


Rys. 6. Widok modelu 3D modernizacji stacji Bond Street; istniejące tunele w przezroczystych kolorach, nowe tunele w kolorze żółtym (London Underground) i niebieskim (Crossrail link) [8]

Wolne od kolizji modele BIM (dzięki pełnej koordynacji międzybranżowej realizowanej narzędziami BIM) pozwoliły na spore oszczędności czasu i środków finansowych – co samo z siebie jest ogromnym sukcesem, jednak warty podkreślenia jest jeszcze zupełnie inny aspekt tej inwestycji. Zastosowanie metodyki BIM otworzyło projekt na cały szereg innowacji, możliwych dzięki modelowi informacyjnemu projektowanych i realizowanych obiektów budowlanych. Na przykład dzięki modelowaniu w BIM stacji osiągnięto nie



Rys. 7. Płyty z betonu zbrojonego włóknem szklanym [9]



Rys. 8. Wydrukowany przystanek Crossrail – Bond Street [9]



Rys. 9. Wydrukowana techniką druku 3D makieta w skali 1:1 peronu stacji Crossrail [9]

tylko ciekawe estetycznie, przyjazne człowiekowi formy ścian i stropów (rys. 7), ale równocześnie potwierdzono ich walory na modelu 3D stacji wydrukowanym wprost z modelu BIM (rys. 8), a potem wykonano pod ziemią makietę w skali 1:1, pozwalającą naocznie zweryfikować tezy projektantów (rys. 9).

Wydruk 3D równocześnie stał się fundamentem dla studium wykonalności projektu, zbadania możliwości prefabrykacji i montażu paneli z betonu wzmacnianego włóknem szklanym, o indywidualnych kształtach

i unikalnym miejscu montażu na każdej stacji, a później faktycznej prefabrykacji. Dodajmy, że takie podejście – prawdopodobnie w ogóle niemożliwe do realizacji tradycyjnymi metodami projektowania i wytwarzania – wymagało automatycznie rozwiązania niezwykle skomplikowanego problemu logistycznego związanego z harmonogramowaniem wytwarzania i dostaw paneli wg zasad dostawy *just-in-time*. Dzięki cyfryzacji procesu, przydzieleniu unikalnych numerów identyfikacyjnych w modelu BIM każdemu elementowi, a potem oznaczeniu przez producenta każdego rzeczywistego panelu przydzielonym mu kodem identyfikacyjnym (zrealizowanym w technologii RFID lub QR-code) możliwe było opracowanie szczegółowego harmonogramu wytwarzania i dostarczania paneli, ich łatwa identyfikacja na placu budowy i zainstalowanie w miejscu, które było dla niego przewidziane w projekcie BIM. Pracownicy firm wykonawczych Crossrail mieli na miejscu budowy specjalne kioski BIM, w których mogli podglądać projekt w 3D, identyfikować komponenty, sprawdzać ich parametry czy położenie.

Jeszcze ciekawszym skutkiem w pełni cyfrowego podejścia do projektu Crossrail jest przypadek biznesowy firmy BrydenWood, wykonawcy paneli elewacyjnych GFRC [10]. Firma nie miała gotowej technologii produkcji takich paneli, opracowała ją od zera. Na stronach firmy można przeczytać, że potrzeba opracowania innowacyjnej technologii narodziła się nie tylko ze względów estetycznych, ale przede wszystkim uniknięcia niepotrzebnych ryzyk związanych ze szkodliwymi warunkami zdrowotnymi pokrycia tuneli okładzinami, potrzebą wiercenia setek tysięcy otworów w niewentylowanych pomieszczeniach. Natryskowa metoda wykonania tuneli powodowała do 20 mm błędów względem modelu/projektu, sam montaż (a raczej dopasowanie paneli) byłby więc niezwykle uciążliwym procesem i to niegwarantującym jakości. Ograniczona przestrzeń tuneli nie pozwalała na użycie ciężkiego sprzętu, montaż musiał być ręczny. Oznaczało to limit dla wagi paneli, ich rozmiaru i operacji potrzebnych do montażu. Ściany tuneli i stacji Crossrail pokrywa 23 tysiące opisywanych paneli. Dzięki zupełnie innowacyjnemu cyfrowemu procesowi projektowania i wytwarzania (CNC, druk 3D), udało się uzyskać:

- redukcję wagi okładziny i konstrukcji nośnej 58%,
- montaż – tylko dwie osoby,
- redukcję ilości mocowań – 96%,
- redukcję całkowitej ilości części – 46%.

Przypadek firmy BrydenWood jest więc znakomitą ilustracją faktu, że zarządzanie realizacją inwestycji w metodyce BIM przynosi nie tylko doraźne skutki dla

projektu (choć oczywiście są one głównym powodem implementacji BIM w projekcie), ale ma ogromny potencjał kreowania nowej wartości na rynku, rozwijania innych przełomowych technologii sprzyjających poprawie wyników projektów, branży budowlanej, tworzenia przyjaznej człowiekowi i środowisku infrastruktury budowlanej.

4. Przykłady wykorzystania cyfrowych technologii

Inteligentny system wspierający proces zarządzania inwestycją – Enprom

Jest to zautomatyzowany system wspierający proces zarządzania inwestycją napowietrznej sieci elektroenergetycznej, integrujący dane z różnych źródeł, w tym dane pozyskane z oblotów dronów. System składa się z 3 modułów, odpowiadających za planowanie tras przelotu dronem, automatyczne zbieranie danych z różnych źródeł (otwarte dane, dane pozyskane w wyniku inwentaryzacji) oraz zarządzanie inwestycją zgodnie z wymaganiami BIM, wraz z automatycznym harmonogramowaniem i wykrywaniem ryzyka. System znajduje się obecnie na etapie prac wdrożeniowych. Projekt zakłada zastosowanie technologii z zakresu danych przestrzennych dwuwymiarowych (otwarte bazy danych GIS, mapy tematyczne, zdjęcia satelitarne), modeli trójwymiarowych (chmury punktów 3D oraz technologia BIM), a także szerokie zastosowanie możliwości sztucznej inteligencji oraz machine learningu. Proces ten wykorzystuje możliwości sztucznej inteligencji w kontekście analizy i integracji danych przestrzennych. Umożliwia to detekcję obiektów o zróżnicowanych cechach fizycznych, tj. kształcie, barwie, teksturze na zdjęciach.

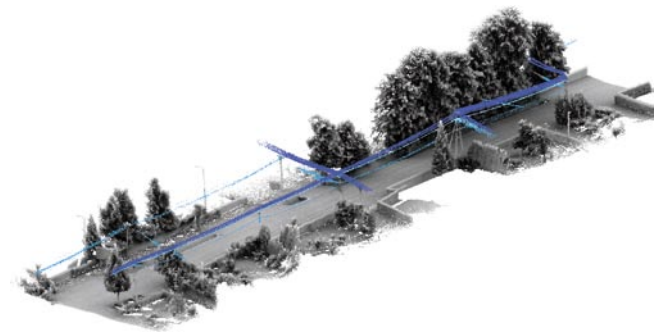


Rys. 10. Wykrycie usterki – uszkodzony izolator [11]

Wyuczony model wykrywa wszelkie nieprawidłowości na podstawie stworzonej w procesie treningowym bazy wiedzy o prawidłowym wyposażeniu obiektu (brakujące śruby, uszkodzenia izolatorów, uszkodzenia powierzchni, deformacje itp.). W trakcie prac badawczo-rozwojowych w kontekście detekcji obiektów i usterek wykorzystano liczne metody Computer Vision oraz AI, oparte o sieci neuronowe w celu wskazania optymalnego rozwiązania, dającego najbardziej wiarygodne i precyzyjne wyniki. Analogiczne modele mogą posłużyć wykrywaniu wad konstrukcyjnych, miejsc kolizyjnych, a także monitoringu placu budowy i przestrzegania zasad bezpieczeństwa (noszenie kamizelek z elementami odblaskowymi, kasków ochronnych itd.).

Mobilny skaningu dróg (etap przygotowania do inwestycji, planowanie inwestycji, monitorowanie) – Smart Factor

Wykorzystanie mobilnego skaningu dróg w kontekście przygotowania do inwestycji pozwala na wskazanie optymalnych tras dojazdowych do obszaru inwestycji oraz zaplanowanie tras objazdowych, w przypadku gdy wymaga tego realizacja projektu. Oprócz wskazania optymalnych tras dojazdowych zmapowany teren inwestycyjny w postaci modelu 3D umożliwia dokładną weryfikację terenu inwestycji, określenie jego ukształtowania, w tym spadków.

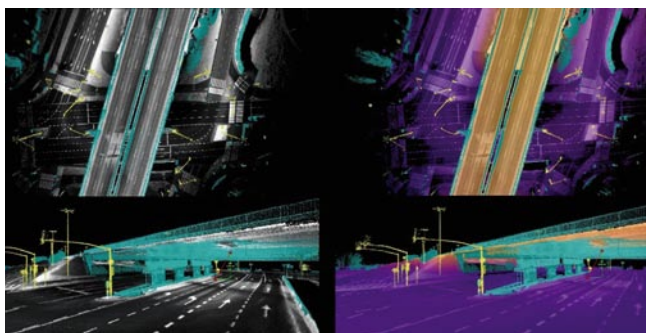


Rys. 11. Cyfrowe odwzorowanie obszaru pasa drogowego w postaci chmury punktów 3D [3]

Inwentaryzacja dróg i obiektów infrastruktury drogowej (oznakowanie poziome i pionowe) na potrzeby przeprowadzenia remontów dróg

Metoda skaningu laserowego jest wykorzystywana do pomiaru elementów pasa drogowego, a następnie przetworzenia danych do kompletnego modelu 3D w postaci chmury punktów. Produkt końcowy zawiera pełną informację o aktualnym stanie infrastruktury drogowej, odwzorowanej w środowisku komputerowym: cyfrowe odwzorowanie znaków poziomych

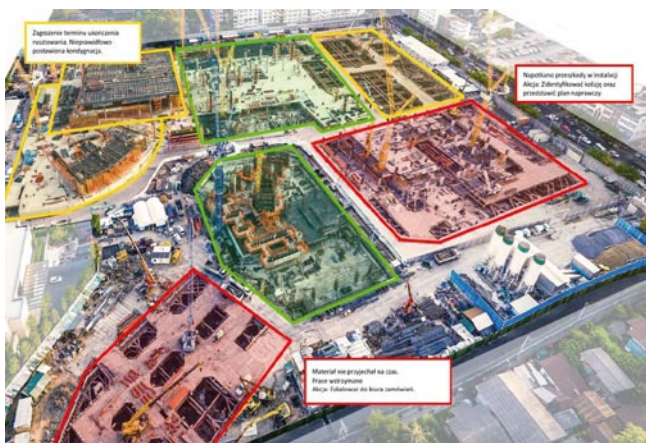
i pionowych na jezdni, informacje na temat przebiegu napowietrznych sieci uzbrojenia terenu, miejsca usytuowania drzew i pozostałych elementów zieleni w mieście, a także elementy małej architektury. Model 3D z odniesieniem przestrzennym pozwala na określenie kilometrażu pasa dla każdego jego fragmentu oraz wykonanie pomiarów długości, wysokości i odległości między obiektami. Wiedza na temat dokładnych wymiarów elementów i ich lokalizacji pozwala na zaplanowanie prac remontowych w oparciu o wiarygodne dane, w odniesieniu do pikietażu odcinków drogi.



Rys. 12. Cyfrowa identyfikacja elementów infrastruktury drogowej [3]

Zarządzanie placem budowy – SkySnap

- Zarządzanie placem budowy z wykorzystaniem dronów oraz modeli komputerowych umożliwiającą stały monitoring obszaru budowy wraz z wykryciem materiałów i maszyn, a także zagrożeń i różnego typu kolizji.



Rys. 13. Wykorzystanie modeli komputerowych w monitoringu placu budowy [12]

- Zastosowanie modeli BIM w celu wizualizowania kluczowych faz projektu, weryfikacji zgodności z harmonogramem, a także monitorowanie kolizji i wprowadzanie poprawek na budowie, poprzez porównywanie projektu z modelami komputerowymi.



Rys. 14. BIM w inwestycji budowlanej [12]

5. Podsumowanie

Proces projektowania i zarządzania inwestycją budowlaną wymaga dostarczania wysokiej jakości danych o dużym stopniu szczegółowości. Oznacza to, że musimy sobie radzić z ogromnymi zbiorami informacji, której właściwe przetwarzanie może stanowić podstawową przesłankę w procesie decyzyjnym. Staje się to możliwe w dynamicznie rozwijających się technologiach pozyskiwania danych, ich przetwarzania i wyciągania wniosków przy jednoczesnym stałym wzroście możliwości obliczeniowych. W efekcie przedstawione w niniejszym artykule wybrane przykłady zastosowań odgrywają bardzo istotną rolę w planowaniu, projektowaniu i zarządzaniu inwestycjami budowlanymi. Można śmiało stwierdzić, że sztuczna inteligencja będzie stanowiła coraz częściej występujący komponent wspomagający projektanta.

Artykuł był prezentowany na konferencji „Nowoczesne technologie w budownictwie – wybrane zagadnienia” w Łodzi 31.03.–1.04.2022 roku.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://www.caliper.com/glossary/what-is-a-map-layer.htm>
- [2] <https://projektowaniebim.pl/bim-jako-akronim/>
- [3] <https://smartfactor.pl>
- [4] <https://govdesignhub.com/2019/08/30/the-future-of-aec-why-we-need-to-close-the-gap-between-bim-and-gis/Yi8h-I-ZOUl>
- [5] https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_LC-EEB-08-2020
- [6] Kasznia D., Magiera J., Wierzowiecki P., BIM w praktyce: standardy, wdrożenie, case study, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017
- [7] <https://blog.allplan.com/en/5-benefits-of-bim-for-construction-management>
- [8] <https://www.researchgate.net/figure/3D-model-view-of-Bond-Street-Station-Upg>
- [9] <https://www.inition.co.uk/3d-printing-project-for-crossrail-bond-street/>
- [10] <https://www.brydenwood.co.uk/projects/crossrail/s1139/>
- [11] www.enprom.pl
- [12] https://dronywbudownictwie.pl/pl_PL/