

Modelowanie, technologia pomiarów i monitoring w dorobku badawczym Zakładu Geodezji

Modeling, measurement technology and monitoring in the research achievements of the Division of Geodesy

Streszczenie

Działający na Politechnice Poznańskiej Zakład (obecnie Pracownia) Geodezji od początku do czasów współczesnych realizował misję wspomagania budownictwa w następujących blokach zagadnień:

- wykonywanie map wielkoskalowych lub innych modeli obiektów budowlanych albo otaczającego terenu obecnych lub przyszłych inwestycji;
- wdrażanie nowych rozwiązań pomiarowych wynikających z rozwoju technologicznego, a także własnych rozwiązań w zakresie sprzętowym i metodologicznym;
- wykonywanie modeli sieci uzbrojenia terenu wsparte podstawowymi analizami sieciowymi;
- wykonywanie innych analiz przestrzennych, a w szczególności monitorowanie przemieszczeń i odkształceń obiektów budowlanych lub inżynierskich albo ich części.

Działania te w sposób przeglądowy zaprezentowano w niniejszej publikacji.

Abstract

The Division (currently Laboratory) of Geodesy, operating at the Poznań University of Technology, from the very beginning of its activity to this time, carried out the mission of supporting civil engineers in the following areas:

- preparation of large-scale maps or other models of construction objects or the surrounding area of current or future investments;
- implementation of new measurement solutions resulting from technological development, as well as own solutions in the field of equipment and methodology;
- making models of the utilities network supported by basic network analyzes;
- performing other spatial analyzes, in particular monitoring displacements and deformations of construction or engineering structures, or their parts.

These activities are presented in an overview in this paper.

1. Wprowadzenie

Podstawowym zadaniem geodezji i kartografii jest takie wymodelowanie przestrzeni związanej z powierzchnią Ziemi, aby opis położenia i kształtu obiektów z nią związanych mógł być, bez widocznej straty dokładności, w 3-wymiarowym ortogonalnym układzie współrzędnych. Ważnym elementem modeli tworzonych przez geodetów jest także zapis i prezentacja wybranych, istotnych dla odbiorcy cech obiektów definiowanych w ramach tych modeli. Taki statyczny opis przestrzeni gromadzony jest od kilku wieków – nie licząc antycznych artefaktów – w postaci wielkoskalowych map oraz powiązanych z nimi dokumentów opisowych. Obecnie prezentacja modeli 3D ma postać komputerową, zaś dane terenowe gromadzone są innymi niż dotychczas metodami. Od kiedy precyzja instrumentów pomiarowych na to pozwoliła, geodezja coraz bardziej angażuje się w opis

zmian cech modelowanych obiektów – głównie zmian geometrycznych, ale w nowoczesnym ujęciu również jakościowych.

Modelowanie geometryczne bazuje na transformacjach wyników pomiaru terenowego do przyjętego układu współrzędnych przez nawiązanie pomiarów do sieci punktów odniesienia nazywanych osnową geodezyjną. Ważnym czynnikiem na etapie pozyskiwania i przetwarzania danych pomiarowych jest ciągła kontrola poprawności realizacji poszczególnych czynności geodety wspomagana przez zaimplementowane zasady rachunku wyrównawczego i teorii błędów. W efekcie dowolny punkt na Ziemi ma określone położenie poziome (współrzędne x , y) i/lub wysokościowe (H) wraz z jego charakterystyką dokładnościową. Z geodezyjnego punktu widzenia mowa jest tu o dokładnościach z zakresu 0,02-0,05 m, czyli takich, które nie są praktycznie dostrzegalne. Podstawowym modelem opisującym obiekty związane z powierzchnią Ziemi jest mapa zasadnicza – wielkoskalowe opracowanie kartograficzne przedstawiające trzy podstawowe grupy obiektów: obiekty ewidencyjne, sieci uzbrojenia terenu oraz wybrane inne obiekty topograficzne. Mapa ta ma powszechne zastosowanie w gospodarce, w sądownictwie, gospodarce nieruchomościami oraz w przygotowaniu i ewidencjonowaniu procesów inwestycyjnych.

Wraz z rozwojem technologicznym, szczególnie w zakresie komputeryzacji i informatyzacji, wzrasta zapotrzebowanie na coraz dokładniejszy opis przestrzeni. To zaś wiąże się z koniecznością stosowania pomiarów coraz bardziej wyrafinowanych technologicznie, a także zastosowania informatyki w zakresie gromadzenia danych oraz ich archiwizowania i efektywnego przetwarzania, co w efekcie otwiera drzwi na wykonywanie licznych, coraz bardziej wyrafinowanych analiz przestrzennych.

Problematyka modelowania, analizowania i wizualizacji chwilowych cech obiektów budowlanych i inżynierskich, albo ich istotnych elementów, staje się zatem zagadnieniem samym w sobie, a jego efektem powinien być wiarygodny, precyzyjny i kompleksowy opis tych cech oraz ich zmian w czasie lub w funkcji wpływu określonych czynników. Wraz z postępem technologicznym powinno do tego prowadzić wykorzystanie różnych technik pomiarowych i zastosowanie odpowiedniego aparatu obliczeniowego. Jest to zatem ciągła tendencja rozwoju technologii geodezyjnej. Z punktu widzenia budownictwa technologia ta ma zatem zapewnić poprawne, precyzyjne, odporne na wpływ czynników zakłócających modelowanie geometrycznych cech obiektów oraz ich zmian.

2. Działalność badawczo-wdrożeniowa realizowana na uczelni

Poza dydaktyką Zakład Geodezji zaangażowany jest w badania rozwojowe z zakresu geodezji i kartografii. Przez cały okres jego działalności zatrudnieni w nim pracownicy realizowali misję wspomagania budownictwa w następujących blokach zagadnień:

- 1) wykonywanie map wielkoskalowych lub innych modeli obiektów budowlanych albo terenu, względem którego planowane jest (było) podjęcie aktywności inwestycyjnej;
- 2) wdrażanie nowych rozwiązań pomiarowych wynikających z rozwoju technologicznego, a także własnych rozwiązań w zakresie sprzętowym i metodologicznym;
- 3) wykonywanie modeli sieci uzbrojenia terenu wsparte podstawowymi analizami sieciowymi;
- 4) wykonywanie innych analiz przestrzennych, a w szczególności monitorowanie przemieszczeń i odkształceń obiektów budowlanych lub inżynierskich albo ich części.

2.1. Rozwój kartografii geodezyjnej

Podstawowym pytaniem badawczym z zakresu mapy zasadniczej jest ocena technik pomiaru szczegółów i opracowania mapy, a także poszukiwanie nowych sposobów wykonania tych czynności. Ostatnie dziesięciolecia przyniosły dwie nowinki technologiczne, które w rewolucyjny sposób zmieniły podejście do wykonywania mapy – były to:

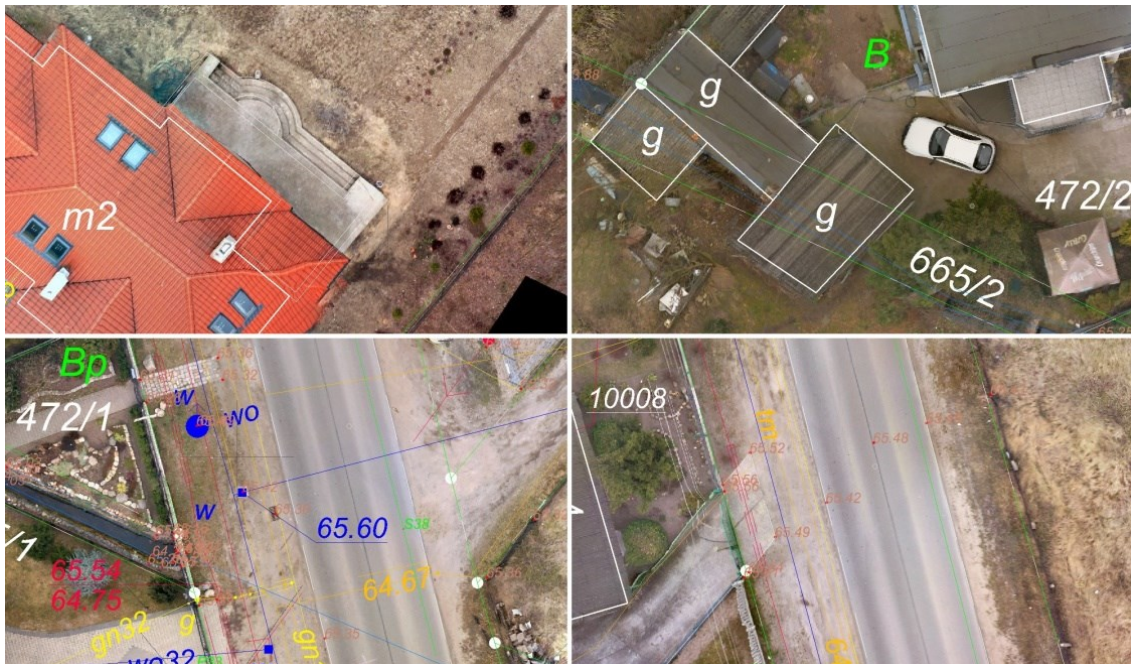
- 1) programy komputerowe łączące w sobie rysunek wektorowy i zapis bazodanowy,

2) satelitarna technika pomiaru położenia określana skrótem GPS, a później – GNSS.

Efektom zastosowania tej pierwszej rewolucyjnej przemiany było powstanie programów typu GIS/SIP. W efekcie zainicjowano sukcesywne przekształcanie państwowego zasobu geodezyjnego na postać numeryczną, co w efekcie zupełnie zmieniło sposób działania powiatowych ODGiK. Włączając się w działalność w tym zakresie, podejmowano się oceny dokładności danych źródłowych [1], a także sposobu i zakresu ich praktycznego wykorzystania. Uzyskane spostrzeżenia wpisały się w nurt wskazujący konieczność płynnego zastępowania starych danych wynikami nowych pomiarów. Podejmowano także próby realizacji praktycznych opracowań z przeznaczeniem ich do celów ewidencyjnych i projektowych [2].

Podstawowym sposobem zapewnienia odpowiedniej jakości opracowań były i wciąż są techniki pomiarowe. Interesujące w tym zakresie było wdrażanie nowej techniki bazującej na przetwarzaniu satelitarnych sygnałów pomiarowych – najpierw GPS, a następnie innych współtworzących obecnie szeroki arsenał satelitów GNSS. Ta nowa technika nie budziła optymizmu zarówno wśród wykonawców pomiarów geodezyjnych, jak i administracji. Podjęto w tym zakresie szeroki zakres badań dokładnościowych i prac wdrożeniowych tej techniki do produkcji geodezyjnej. Szczególnych korzyści doszukiwano się w kinematycznym trybie pomiaru RTK. Liczne testy i pomiary wdrożeniowe [3] wykazały, że technika ta jak najbardziej nadaje się do pozyskiwania danych mapowych. Prace te wykonywano we współpracy z prywatnym przedsiębiorcą – firmą GEO-SAT Łucjan Głowacki, głównym sponsorem wspomnianych badań. Oceniono, że odpowiednie podejście do pomiarów GPS/GNSS zapewnia szybkie uzyskanie dokładnych i wiarygodnych wyników. Mimo promocji tych badań dopiero po około 10 latach administracja geodezyjna dopuściła pomiary GNSS jako pełnowartościowe źródło danych przestrzennych. Obecnie jest to najbardziej popularna technika pomiarowa w geodezji.

Kolejnym kamieniem milowym w technologiach pomiarowych było wykorzystanie BSL/UAS (bezzałogowych systemów latających) do fotogrametrycznych pomiarów na podstawie zdjęć cyfrowych z niskiego pułapu [4, 5]. Technika ta spotkała się z jeszcze większą wstrzeźliwością środowiska geodezyjnego niż GNSS. W ramach badań wdrożeniowych w tym zakresie wykonano liczne testowe pomiary inwentaryzacyjne, które wykazały, że przy odpowiednim podejściu możliwe jest uzyskanie dokładności porównywalnych do pomiaru tradycyjnego [5], również w pomiarach przeznaczonych na wymagające potrzeby ewidencji gruntów i budynków [6]. Metody fotogrametryczne opierające się na zdjęciach z bezzałogowych maszyn latających mogą w niedalekiej przyszłości stać się kluczowym materiałem służącym do rozwiązania wielu problemów związanych z weryfikacją, inwentaryzacją oraz aktualizacją zasobu geodezyjnego zgromadzonego w bazach BDOT500, GESUT i EGiB. Wstępne projekty studialne i przeprowadzone analizy wykazują nie tylko wysoką efektywność proponowanych rozwiązań, ale także dostarczają aktualnych danych o dużej dokładności, dlatego też dane z pułapu UAV według autorów mogą w przyszłości stać się podstawowym źródłem nie tylko pozyskiwania danych do zasilania wspomnianych baz, ale również elementem wspomagającym ich kontrolę i weryfikację.



Rys. 1. Korelacja opracowania ortofoto i danych wektorowych oraz pomiaru GPS-RTK [5]

2.2. Modelowanie i analizy przestrzenne

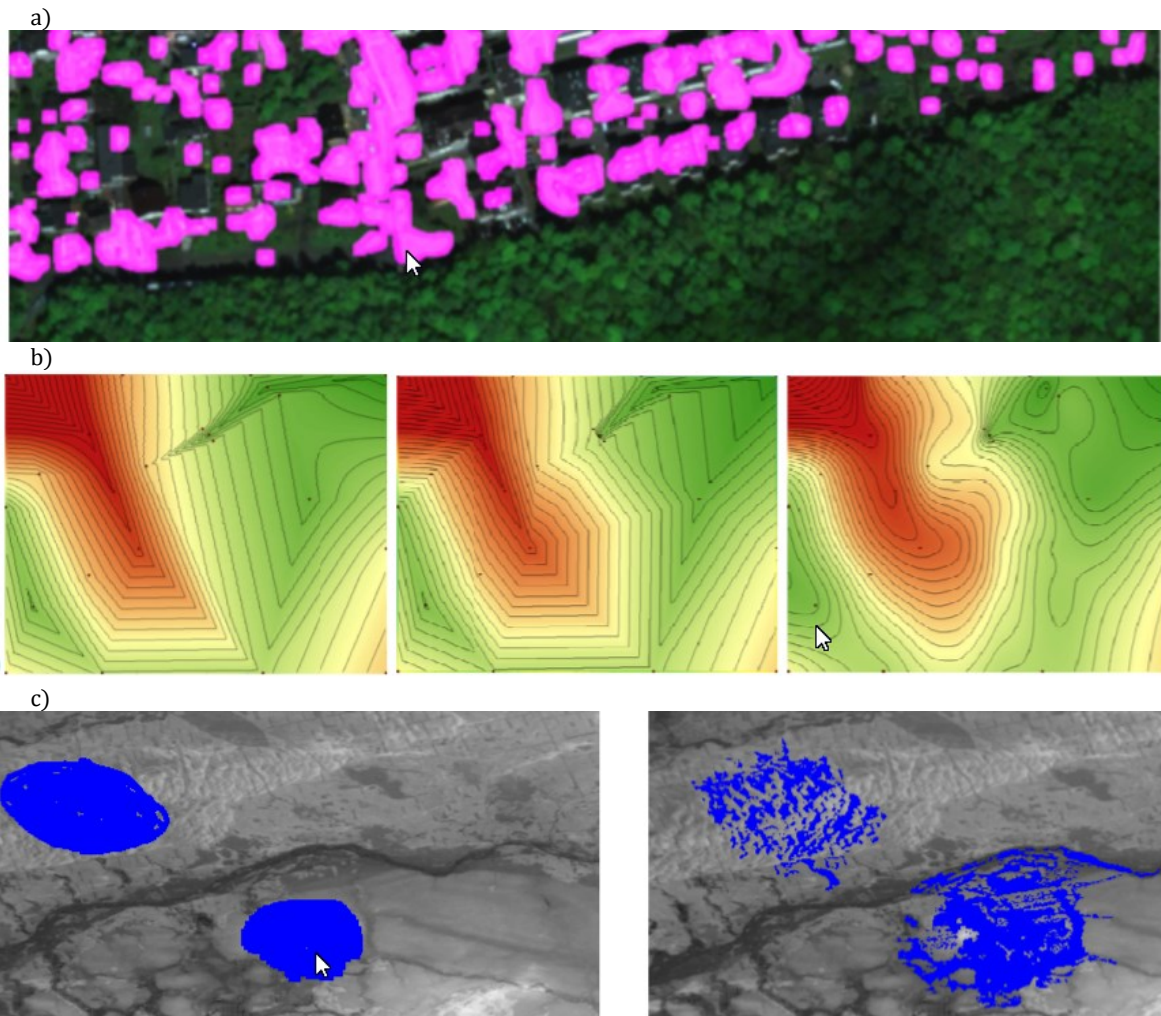
Obok mapy zasadniczej pomiary geodezyjne zastosowano w celach badawczych – jednym ze spektakularnych efektów tych prac było wykorzystanie techniki tachimetrycznej i skaningu laserowego 3D do poszukiwania śladów meteorytów na poligonie badawczym Morasko [7]. Korzystając z możliwości współczesnego oprogramowania typu GIS, było możliwe utworzenie modelu 3D, a także analizy form terenowych w celu poszukiwania potencjalnych miejsc upadku meteorytów.

Na potrzeby modelowania analiz przestrzennych zmodyfikowano teorię automatów komórkowych (AK) w kierunku ich współdziałania z dodatkowymi warstwami danych przestrzennych [8], dzięki czemu automaty zyskały nową funkcjonalność określoną jako kartograficzna (KAK). Wykorzystano je praktycznie do: a) selekcji wybranych cech na zdjęciach lotniczych lub satelitarnych (rys. 2a), b) modelowania 3D terenu z uwzględnieniem nieprostoliniowości spadków terenu między pikietami (rys. 2b) oraz c) modelowania spływu wody na i pod powierzchnią terenu (rys. 2c) z uwzględnieniem parametru wodoprzepuszczalności gruntu [9].

Efekty uzyskane z powyższych badań stały się zalążkiem dalszych inspiracji zarówno teoretycznych, związanych z dążeniem do optymalnych wyników [10], jak i próbami zastosowań praktycznych [11]. Efektem analiz dokładnościowych z użyciem AK jest metoda modelowania wektorowego pola przemieszczeń, natomiast wstępne prace projektowe w zakresie modelowania osuwisk zapowiadają interesujące zastosowania praktyczne automatów kartograficznych (KAK).

Bogatą grupę standardowych zastosowań GIS stanowią analizy sieciowe. W tym zakresie podejmowano rozwiązanie następujących zagadnień badawczych:

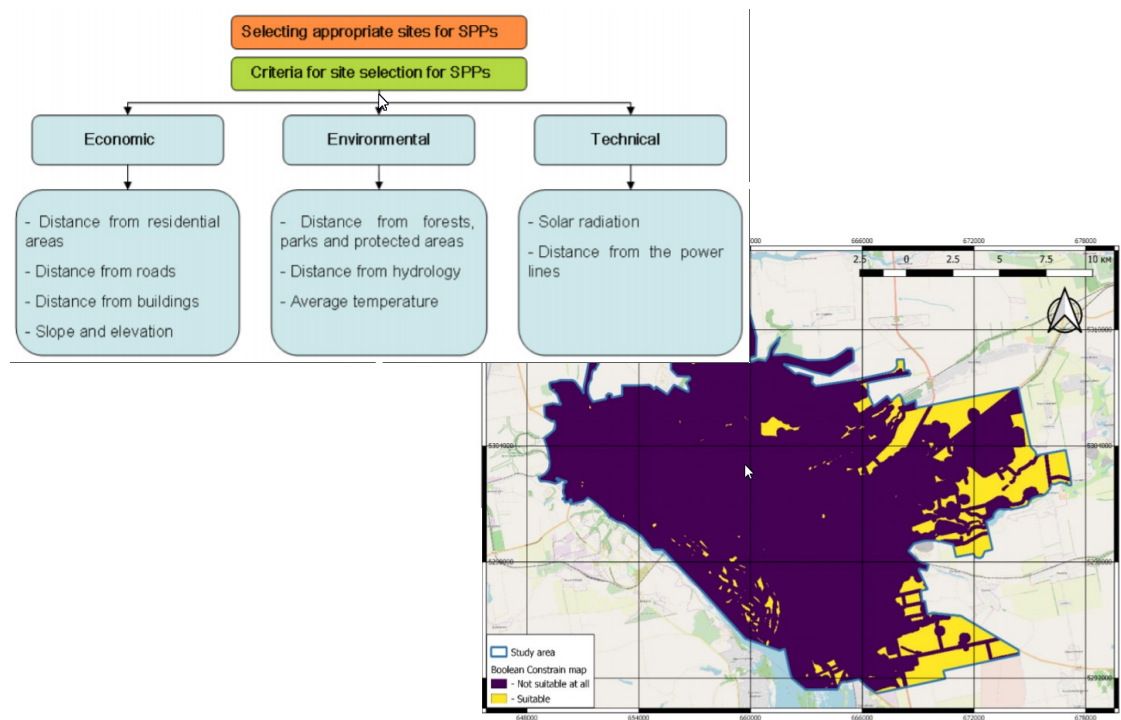
- 1) zastosowanie analiz przestrzennych w zarządzaniu sieciami wodociągowymi [12],
- 2) koncepcja zintegrowanego systemu informacji przestrzennej do zarządzania sieciami wodociągowo-kanalizacyjnymi [13] oraz ciepłowniczymi [14],
- 3) symulacja pracy układów sieci wodociągowej na podstawie zaawansowanych algorytmów sieciowych [15].



Rys. 2. Wybrane zastosowania kartograficznych automatów komórkowych: a) selekcja cech na zdjęciach satelitarnych, b) w modelowaniu ukształtowania terenu, c) w symulacji procesów wodno-gruntowych [9]

Na potrzeby realizacji powyższych tematów wykorzystano algorytmy zaimplementowane w programach ArcGIS (ESRI) oraz SAGA. Opublikowane funkcjonalności wsparte przykładami praktycznymi mogą znaleźć skuteczną implementację w zagadnieniach praktycznych.

Zdecydowanie praktyczny charakter ma opublikowane w [16] podejście do poszukiwania terenów pod elektrownię fotowoltaiczną. Problemem w tym zakresie jest konieczność wybrania rozległych terenów zapewniających z jednej strony wyprodukowanie odpowiedniej ilości prądu, a z drugiej – dostęp do sieci i zapotrzebowanie potencjalnych odbiorców. Prace badawcze wykonano we współpracy ukraińsko-polskiej dla obszaru Zaporozża. W wielokryterialnych analizach wykorzystano metodę AHP oraz algebrę map.



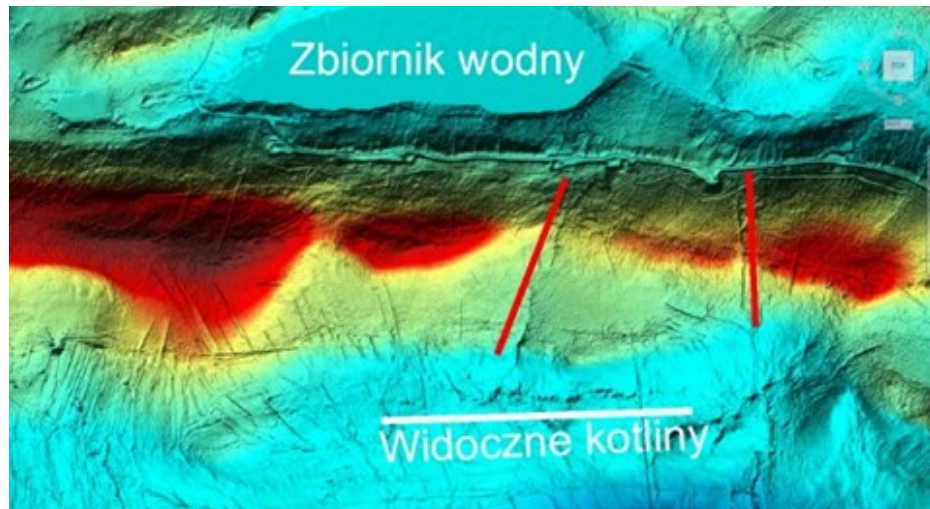
Rys. 3. Procedura poszukiwania odpowiedniego miejsca na elektrownię fotowoltaiczną: a) zestaw kryteriów selekcji terenów, b) wynikowa mapa kryterialna [16]

Podobny charakter ma praca [17], w której planowanie lokalizacji turbin wiatrowych uzależniono od wyników pomiarów zagospodarowania i ukształtowania terenu. Pomiarzy te wykonano z użyciem techniki LiDAR. Korzystając z ww. danych, daje się wyraźnie zauważyć wysoką zależność pomiędzy uzyskaną charakterystyką modelu terenu a lokalizacją podziemnych przestrzeni geologicznych mogących zagrazać konstrukcjom, które mają powstać na danym obszarze (rys. 4). Podczas budowy farm wiatrowych (tudzież pojedynczych turbin) nacisk na powierzchnię jest tak potężny, że przy nieodpowiednim dobraniu lokalizacji konstrukcja zwyczajnie może runąć. Wyniki poparto badaniami geofizycznymi gruntów, wykorzystując trzy metody: tomografię elektrooporową – ERT, GPR – metodę georadarową, a także metodę sejsmiczną.

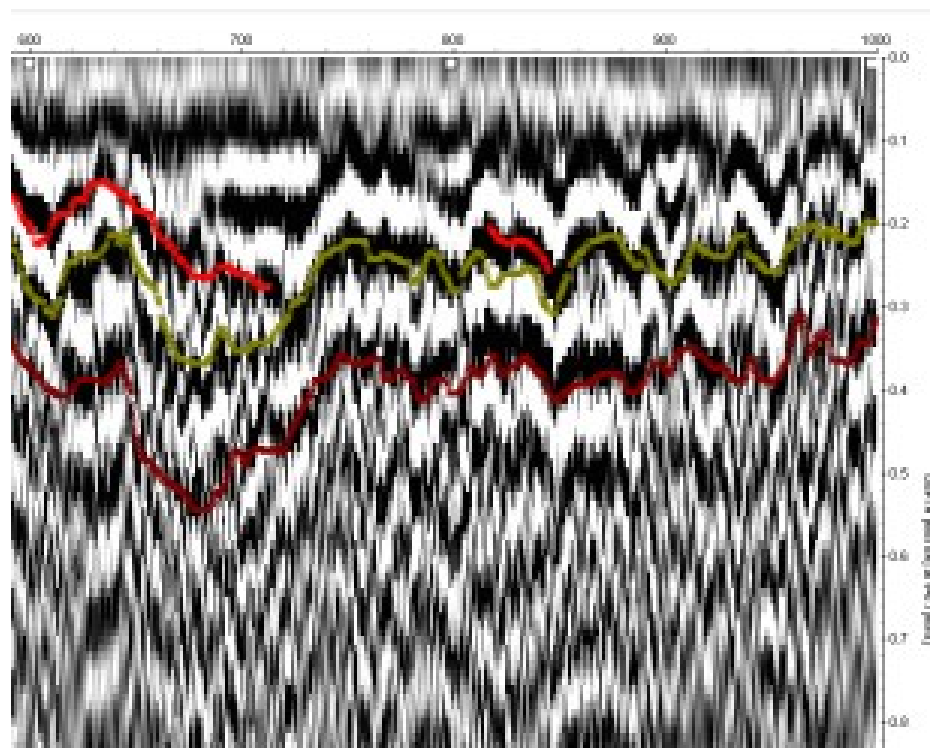
Połączenie technologii LIDAR oraz georadaru posłużyło do badania stanu nawierzchni drogowej w środowisku niestabilnych gleb o określonej charakterystyce geologicznej [18]. Podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób przy zastosowaniu powyższych metod pozyskiwania danych o strukturze i charakterystyce terenu można znaleźć czy też potwierdzić charakterystykę gruntów, na których mają zostać lub zostały wykonane projekty drogowe w istocie same wymagające wysokiej trafności lokalizacji co do stabilności i trwałości podłoża (rys. 5). Poszukiwano ponadto odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób można identyfikować nie tylko konstrukcje nawierzchni drogowej, ale również jak lokalizować podziemne przestrzenie powstałe bądź pod wpływem przepływu wody, bądź też z racji struktur geologicznych charakteryzujących podłoże jako niespójne (rys. 6).

Elementem rozwojowym wszystkich opisanych wyżej prezentacji kartograficznych jest obecnie technika wizualizacji wirtualnej (VR, XR) rozwijana w oprogramowaniu typu BIM, ale dostępna w coraz szerszym spektrum zastosowań, gdzie efekty analiz przestrzennych mają charakter numeryczny, a więc wirtualny. W pracy [19] przedstawiono aktualne możliwości techniczne jej

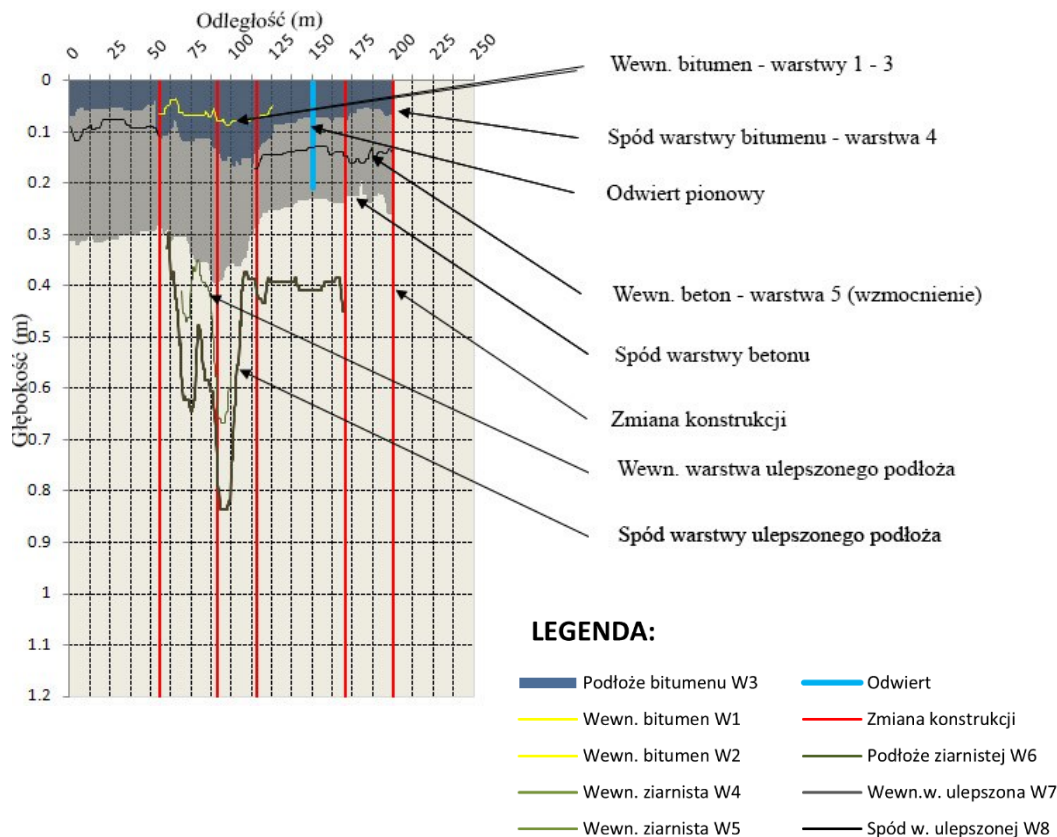
zastosowania w odniesieniu do wielkoskalowych map inżynierskich, ale możliwe w innych wyżej opisanych przypadkach.



Rys. 4. Przetworzone za pomocą aplikacji Surfer dane LIDAR z zaznaczonymi zmianami topografii świadczącymi o zagrożeniach [17]



Rys. 6. Dane z anteny 400 MHz prezentujące 400-metrowy odcinek drogi po zaimplementowaniu filtrów i procesów lokalizacyjnych wraz z naszkicowaną interpretacją kolejnych warstw nawierzchni [18]



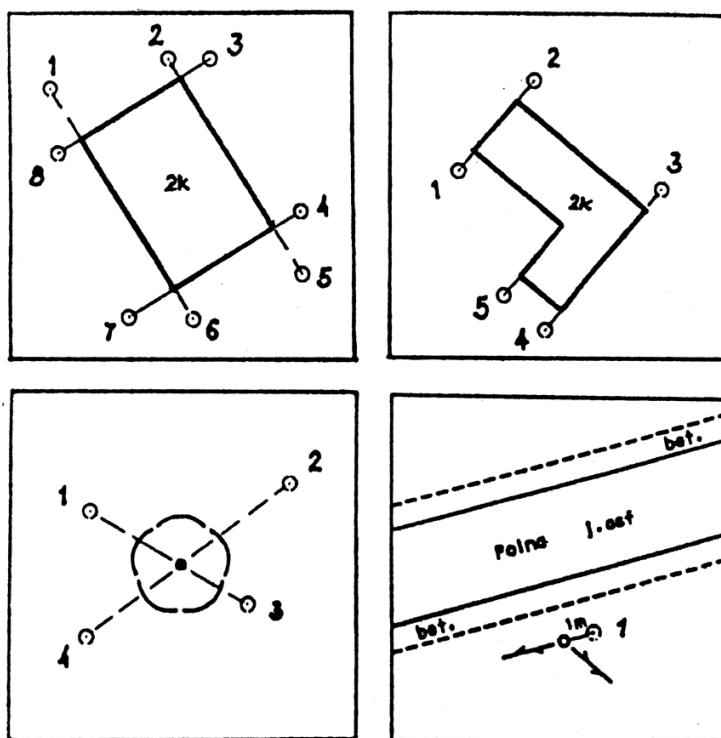
Rys. 7. Wykres powstały z utworzonego w MS Excel makra bazującego na danych otrzymanych z pomiarów i interpretacji dla rozważanego fragmentu nawierzchni [18]

2.3. Wdrażanie i modyfikacja technologii pomiarowych

Podstawową tradycyjną techniką pomiarową jest obecnie tachimetria, która współcześnie została wyposażona w dalmierze elektromagnetyczne – precyzyjne, niezawodne narzędzia pomiarowe, które otwierają przed nią szerokie, niemal nieograniczone perspektywy [20]. Dopóki bowiem pomiary kątów były znacznie dokładniejsze od pomiarów długości, precyzyjne wyniki uzyskiwano, stosując jedynie metody pomiarów kątowych (wspomagane odległościami jedynie w celu ustalenia skali). Nazwano je trygonometrycznymi, gdyż wyniki uzyskiwano, stosując mniej lub bardziej wyrafinowane zależności trygonometryczne. Również podejście do obliczeń ścisłych musiało uwzględniać jedynie czynniki zakłócające pomiary kątów. Bazując na takich przesłankach, M. Wójcik przez wiele lat rozwijał metody opracowania kątowych danych pomiarowych w precyzyjnych zastosowaniach geodezji. W tym celu pracował nad ograniczeniem wpływu refrakcji pionowej na pomiary kątów pionowych [21], a także nad odpowiednim doborem kształtu trygonometrycznych sieci pomiarowych [22, 23]. Po osiągnięciu możliwości łącznego opracowania pomiarów kątowych i liniowych wzbogacił asortyment swoich rozwiązań o czynnik liniowy [24], a także o zastosowanie obu metod w pomiarach obiektów inżynierskich [25].

Wraz z udostępnieniem technologii GPS do celów cywilnych, w szczególności techniki kinematycznej RTK, podjęto się jej testów wdrożeniowych zarówno na poligonie testowym Malta [26], jak i w praktycznych zastosowaniach (wspomniany już wyżej pomiar stacji kolejowej [2] lub pomiary osnowy realizacyjnej na budowie autostrady A2). Wyniki tych prac wraz ze sformułowanymi wówczas wnioskami zawarto w publikacji [3]. Między innymi wskazano tam na możliwości rozwiązań technicznych (rys. 8), które obecnie są powszechnie implementowane

w oprogramowaniu odbiorników satelitarnych. W konkluzjach stwierdzono wówczas (jeszcze w końcu XX wieku, kiedy było wielu wpływowych oponentów tej nowej techniki pomiarowej), że technika RTK może znaleźć powszechne zastosowanie w geodezji dzięki uzyskiwaniu odpowiednich dokładności oraz rozległym możliwościom pomiarowym.



Rys. 8. Rozwiązania techniczne proponowane w publikacji [8] a powszechnie stosowane we współczesnych odbiornikach GNSS

3. Pomiary przemieszczeń - monitoring strukturalny

Podstawowym polem działalności naukowej realizowanej w Zakładzie Geodezji są inżynierskie pomiary diagnostyczne i kontrolne. W ich skład wchodzi jednorazowe lub cykliczne pomiary stanu geometrycznego budowli lub struktur przestrzennych. Powinny one cechować się najwyższą dokładnością, a dostarczane wyniki powinny w jednoznaczny, wiarygodny sposób opisywać chwilowy stan geometryczny badanego obiektu albo jego zmiany. W pierwszym rzędzie temu celowi służy adaptacja tradycyjnych metod pomiarowych pod kątem zastosowania ich w odniesieniu do konkretnych obiektów i sytuacji. Przedmiotem adaptacji – obok dostosowania do warunków terenowych – są sposoby pozyskiwania i opracowania danych pomiarowych, minimalizacja wpływu czynników zewnętrznych na wyniki pomiaru, eliminacja błędów grubych i – w końcu – dogłębna analiza wyników wskazująca na cechy badanego obiektu odstające od przyjętej normy.

W pracach [22, 23] podjęto próbę dostosowania tradycyjnej metody pomiaru trygonometrycznego do pomiarów przemieszczeń. Zdefiniowano różnicowe podejście do pomiarów, sformułowano postać równań obserwacyjnych użytych do przetwarzania danych, zidentyfikowano i poddano analizie wyłączenia czynniki zakłócające wykonane obserwacje oraz dokonano symulacji tak uzyskanego modelu w celu oceny jego skuteczności oraz faktycznych możliwości dokładnościowych. W pracy [21] analizie poddano główny czynnik zakłócający, jakim

jest refrakcja pionowa. Charakteryzuje się ona zmiennością w czasie i w funkcji rozkładu temperatur dolnych warstw atmosfery, szczególnie nad zbiornikami lub ciekami wodnymi, czyli w typowych warunkach pomiarów mostów. W wyniku pogłębionej analizy opisano problem matematycznie w celu jego eliminacji na etapie obróbki danych pomiarowych.

Praca [25] przedstawia adaptację nowego rozwiązania sprzętowego, jakim jest tachimetr zmotoryzowany, pod kątem jego użycia do pomiarów pionowych przemieszczeń konstrukcji mostowych. W zadaniu tym skupiono się głównie na ocenie skuteczności zastosowania mechanizmów automatycznego celowania i śledzenia celu (pryzmatu). Wraz z tym rozwiązaniem modyfikacji uległ paradygmat definicji punktu pomiarowego – z adaptacji elementów konstrukcji lub zamontowanych na niej znaczków celowniczych na użycie pryzmatów retrorefleksyjnych niezbędnych w pomiarach automatycznych. Wspominaną tu metodę pomiarową testowano na obiektach mostowych, jednak była ona wykorzystywana w licznych innych zastosowaniach.

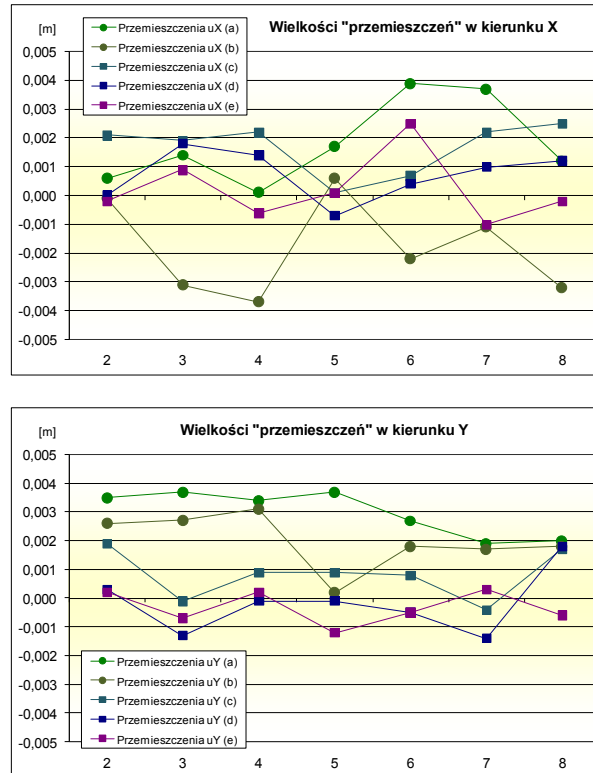
W późniejszych pracach – po uzyskaniu niezbędnego doświadczenia – zautomatyzowane pomiary tachimetryczne stosowano jako referencyjne wobec innych metod pomiarów diagnostycznych. Wyniki pomiaru tachimetrem zrobotyzowanym Leica TCRP 1201+ zastosowano w szczególności jako odniesienie do pomiarów wysmukłych konstrukcji realizowanych za pomocą dwuosiowych pochyłomierzy POSITAL FRABA ASG15 [26]. Na podstawie analizy możliwości tych pochyłomierzy podjęto próbę ich wdrożenia w pomiarach inżynierskich. Porównując pomiary inklinometryczne z tachimetrycznymi, oceniono dokładności wyników pomiarów wychyleń, ich wpływ na ocenę badanego zjawiska oraz możliwość poprawy systematycznych błędów pomiaru. Zwrócono uwagę na szczególną zaletę pochyłomierzy, jaką jest możliwość ciągłego śledzenia geometrycznego stanu obiektów lub konstrukcji inżynierskich. To predestynuje tego typu urządzenia do używania, pod określonymi warunkami, w geodezyjnym monitoringu strukturalnym lub w innych zadaniach inżynierskich.

Jeszcze większe perspektywy rysują się przed pomiarami z wykorzystaniem rozwiązań technologicznych typu MEMS wspomaganych pomiarami tachimetrycznymi, szczególnie w odniesieniu do sensorów inercyjnych [27], które ze względu na brak stabilnego odniesienia muszą być poddawane okresowej kontroli i kalibracji. Metoda opracowana dla takiego podejścia spotkała się z dużym zainteresowaniem specjalistów od monitoringu mostów.

W tym kontekście wielkie nadzieje pokładane są też w trybie RTK techniki satelitarnej GNSS jako realnym narzędziu do quasi-ciągłego monitoringu przemieszczeń niestabilnych struktur przestrzennych, szczególnie tych bardziej rozległych, na co zwrócono uwagę i poddano to analizie w pracy [28]. W odniesieniu do pomiarów przemieszczeń gruntów lub budowli mniej podatnych na szybkie zmiany zaproponowano sposób ścisłego wyrównania obserwacji RTK bazujący na podejściu różnicowym [29]. Testy praktyczne metody wykazały jej dużą precyzję w tego typu zastosowaniach (rys. 9).

Wspomniane wyżej pochyłomierze użyto podczas badań zachowania obrotowej kładki dla pieszych nad kanałem portowym w Ustce [30]. Pochyłomierze zastosowane poza standardowymi pomiarami geodezyjnymi umożliwiły wykrycie nieoczekiwanego zjawiska przechylenia się na boki kładki we wstępnej fazie obrotu. Dzięki temu znaleziono odpowiedź na pytania o nietypowe zachowania kładki w pewnych warunkach pogodowych. Dla potwierdzenia wniosków z tych badań zastosowano opracowanie fotogrametryczne polegające na rejestracji śladu 4 (+ 1 kontrolny) znaczków świetlnych zainstalowanych na omawianym obiekcie [30]. Wyniki pomiaru fotogrametrycznego stały się koronnym dowodem na występowanie zjawiska pochylenia kładki we wstępnej fazie jej obrotu, co przypisano porywowi łożyska utrzymującego ją za pomocą want. Podobne zastosowanie naziemnej metody fotogrametrycznej dostarczyło pouczających danych opisujących zachowanie innych obiektów mostowych – badania tego typu prowadzono we współpracy z centralnym Instytutem Badawczym Dróg i Mostów. Docelowe zastosowanie wspomnianej tu metody wymaga jeszcze dopracowania, adaptacji zastosowanych w niej komponentów i przeprowadzenia testów laboratoryjnych oraz terenowych. Na podstawie

doświadczeń praktycznych [30, 31] plan takich badań opisano w artykule [32], który stanowi propozycję kompleksowego podejścia do monitoringu podatnych konstrukcji mostowych.



Rys. 9. Rozkład wyników na obiekcie testowym dla różnych wariantów obliczeń [25]

Omawiana wcześniej technika tachymetryczna stanowiła inspirację do dalszych prac rozwojowych metody. Jednym z proponowanych rozwiązań jest użycie minizwierciadeł jako przekaźników obrazów mierzonych punktów niewidocznych ze stanowiska tachimetru [33]. Metoda powinna zwiększyć zakres pomiarów z pojedynczego stanowiska w intensywnie zabudowanych obiektach przemysłowych. Podejmowano ponadto testy możliwości wspomnianej techniki w zagadnieniach dynamicznych.

4. Podsumowanie

Techniki pomiarowe opracowane przez geodetów stanowią niezbędny element każdego procesu inwestycyjnego. Jednocześnie opracowywane są nowe rozwiązania zarówno od strony sprzętowej, jak i technologii pomiarowej. Zadaniem zespołu geodezyjnego wspomagającego inżynierów budowlanych jest dostarczanie wiarygodnych danych niezbędnych w ich pracy. To zaś generuje potrzebę prowadzenia prac badawczych co najmniej na następujących polach:

- wdrażanie i testowanie nowych instrumentów pomiarowych,
- rozwój i wdrażanie nowych rozwiązań technicznych pomiaru,
- zastosowanie nowych metod opracowania danych,
- zastosowanie instrumentów i metod pomiarowych oraz oprogramowania w wybranych zagadnieniach praktycznych.

Takie szerokie spektrum zagadnień stanowiło i nadal stanowi bogate źródło inspiracji badawczych, szczególnie dla geodetów zaangażowanych we współpracę z inżynierami budownictwa. Znalazło to odzworowanie w pracach podejmowanych przez wiele lat działalności Zakładu Geodezji, a przedstawionych pobieżnie w niniejszym opracowaniu.

Literatura

- [1] Wyczałek I., Dane geodezyjne w systemach informacji przestrzennej, materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej „Systemy informacji przestrzennej”, Warszawa 1999.
- [2] Wyczałek I., Technika satelitarna Real-Time Kinematic w zastosowaniach geodezyjnych, materiały XIII Konferencji Katedr i Zakładów Geodezji, Szklarska Poręba 1998.
- [3] Wyczałek I., Tryb RTK pomiarów satelitarnych – gadżet czy rewelacja?, „Geodeta” 1998, 9(40), s. 32-34.
- [4] Wyczałek I., Wyczałek M., Plichta A., Inventory measurements based on non-metric aerial photos from the board of unmanned aerial vehicle (UAV), „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury” 2015, t. XXXII, z. 62(3/II).
- [5] Plichta A., Wyczałek I., Wyczałek M., Wykonanie mapy do celów projektowych w oparciu o pomiary fotogrametryczne z pokładu UAV w świetle nowych uwarunkowań prawnych i technicznych, seria „Teoretyczne Podstawy Budownictwa”, t. VI: Geodezyjne systemy pomiarowe dla budownictwa, Warszawa 2014.
- [6] Plichta A., Wyczałek M., Wyczałek I., Opracowanie części graficznej ewidencji gruntów i budynków w oparciu o zdjęcia lotnicze z pokładu UAV, „Zeszyty Naukowe. Inżynieria Środowiska / Uniwersytet Zielonogórski” 2017, nr 165(45), s. 36-48.
- [7] Włodarski W., Papis J., Szczuciński W., Morphology of the Morasko crater field (western Poland): Influences of pre-impact topography, meteoroid impact processes, and post-impact alterations, „Geomorphology” 2017, vol. 295, pp. 586-597.
- [8] Wyczałek I., Użycie automatów komórkowych do modelowania i symulacji zjawisk przestrzennych, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji” 2010, t. 21, s. 459-470.
- [9] Wyczałek I., Projekt i wdrożenie nowej metody modelowania i wizualizacji kartograficznej realizującej ideę automatów komórkowych, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2011, t. 9, s. 113-124.
- [10] Wyczałek I., Error map of landslide model resulting from the adoption of different methods for the definition of displacement field, „Reports on Geodesy” 2011, 1/90, pp. 531-536.
- [11] Wyczałek I., Machowiak K., Plichta A., Flieger M., Krawczyk D., Wyczałek M., Kartograficzne modelowanie wpływu ekstremalnych zjawisk hydrologicznych na obiekty inżynierskie, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej”, 2011, t. 9, s. 125-133.
- [12] Plichta A., Papis J., Zastosowanie analiz przestrzennych w zarządzaniu sieciami wodociągowymi, „Technologia Wody” 2015, nr 5.
- [13] Plichta A., Król M., Zintegrowany system informacji przestrzennej elementem zarządzania sieciami wodociągowo-kanalizacyjnymi, „Technologia Wody” 2015, nr 2.
- [14] Plichta A., Papis J., Zintegrowany system informacji przestrzennej elementem zarządzania sieciami ciepłowniczymi, „Instal” 2017, nr 6, s. 3-6.
- [15] Plichta A., Papis J., Możliwości symulacji pracy układów sieci wodociągowej w oparciu o zaawansowane algorytmy sieciowe, „Technologia Wody” 2016, nr 4(48), s. 30-34.
- [16] Yankiv-Vitkovska L., Peresunko B., Wyczałek I., Papis J., Site selection for solar power plant in Zaporizhia city (Ukraine), „Geodesy and Cartography” 2020, vol. 69, no. 1, pp. 97-116.
- [17] Plichta A., Piasecki A., Usage of LIDAR data in planning of wind turbines location, „Technical Sciences UWM” 2015, no. 18(3) pp. 179-191.
- [18] Plichta A., Piasecki A., LIDAR and ground penetrating radar data in determining road surface conditions and geological characteristics of unstable soils, „Technical Sciences UWM” 2017, no. 20(1).
- [19] Wyczałek I., The map as a part of mixed reality the implementation of construction projects in BIM technology, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2018, nr 27, s. 157-169.
- [20] Wyczałek I., Wyczałek E., Wykorzystanie dalmierzy bezlustrowych w pomiarach diagnostycznych, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2009, s. 29-38.
- [21] Wójcik M., Nowy sposób ograniczenia wpływu refrakcji pionowej w badaniach przemieszczeń pionowych metodą trygonometryczną, „Geodezja i Kartografia” 1993, t. XLII, z. 1, s. 25-36.

- [22] Wójcik M., Wyznaczenie przemieszczeń pionowych metodą ciągów trygonometrycznych, „Geodezja i Kartografia” 1994, t. XLIII, z. 3, s. 179-194.
- [23] Wójcik M., Wykorzystanie różnego typu sieci niwelacji trygonometrycznej (różnicowej) do wyznaczania przemieszczeń pionowych, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Budownictwo Lądowe” 1995, nr 40, s. 318-329.
- [24] Wójcik M., Support of vertical displacements measurement by distance observation with the use of the differential method in trigonometric leveling, „Geodezja i Kartografia” 1997, t. XLVI, z. 4, s. 275-283.
- [25] Wójcik M., Wyczałek I., Nowak R., Test precyzyjnego tachimetru zmotoryzowanego pod kątem jego użycia do pomiarów pionowych przemieszczeń konstrukcji mostowych, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2013, t. 15, s. 145-156.
- [26] Wyczałek I., Wyczałek M., Nowak R., Badania porównawcze i integracja pomiarów pochyleń z pomiarami tachimetrycznymi, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2013, t. 15, s. 157-168.
- [27] Olaszek P., Wyczałek I., Sala D., Kokot M., Świercz A., Monitoring of the Static and Dynamic Displacements of Railway Bridges with the Use of Inertial Sensors, „Sensors” 2020, 20(10), p. 2767.
- [28] Wyczałek I., Wójcik M., Nowak R., Investigations on using GPS/RTK technique in displacement surveys, „Reports on Geodesy” 2009, pp. 429-436.
- [29] Wyczałek I., Wójcik M., Nowak R., Wyrównanie obserwacji GNSS/RTK metodą różnicową w pomiarach przemieszczeń, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2009, nr 6, s. 17-27.
- [30] Wyczałek I., Wyczałek M., Wyczałek E., Diagnostic surveys of displacements of a rotating pedestrian bridge during its movement. 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), 15-17 May 2019, Athens, Greece.
- [31] Wyczałek I., Geodezyjne badania konstrukcji blaszano-gruntowych na etapie ich projektowania, budowy i eksploatacji, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2014, t. 17, s. 107-121.
- [32] Wyczałek I., Wyczałek M., The potential of photogrammetric method of measurement dynamic displacements of flexible bridges, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2017, nr 23, s. 333-345.
- [33] Wyczałek I., Tsantopoulos E., Investigations over using mirrors and prisms in geodetic monitoring of building structures, „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, Journal of Civil Engineering / Environment and Architecture” 2015, z. 62(4), s. 505-518.