

Jadwiga Maciaszek*, Rafał Gawalkiewicz*

ZASTOSOWANIE SKANOWANIA LASEROWEGO W DIAGNOSTYCE OBIEKTÓW PODLEGAJĄCYCH WPLYWOM EKSPLOATACJI GÓRNICZEJ**

1. Wprowadzenie

Konieczność prowadzenia precyzyjnej inwentaryzacji oraz obsługi realizacyjno-montażowej obiektów inżynierskich i górniczych wynika z przepisów prawa budowlanego, prawa geodezyjno-kartograficznego oraz prawa geologiczno-górniczego, a od 2004 roku także z zaleceń Unii Europejskiej. Wszelkie prace zabezpieczające, remontowo-konserwatorskie wymagają inwentaryzacji, na której podstawie sporządza się dokumentację wymagającą odpowiednimi przepisami, instrukcjami i normami. Dotyczy to także przywracania budynkom i obiektom położonym w strefach oddziaływania eksploatacji górniczej funkcji użytkowych, określanych mianem rektyfikacji (prostowania budynków). Przepis artykułu 95 prawa geologiczno-górniczego stanowi, iż szkoda spowodowana ruchem zakładu górniczego winna być naprawiona.

Zgodnie z założeniami projektu budowlanego dla obiektów wznoszonych na terenach górniczych zakłada się przystosowanie budynku na przejęcie odczekań odpowiedniej kategorii terenów górniczych. Układ konstrukcyjny budynku oraz odpowiednie zabezpieczenia przyziemia i kondygnacji powtarzalnych dostosowuje się do przyjętej kategorii. Jeśli są to budynki wysokie zaopatrzone w windę, dopuszczalne wychylenie budynku powinno być bezwzględnie przestrzegane, a wychylenie, większe od dopuszczalnego – korygowane.

Prostowanie budynków prowadzi się w Polsce od 20 lat [3], ale do 2002 roku były to budynki jednorodzinne lub kilkupiętrowe. Po raz pierwszy budynek jedenastokondygnacyjny był z powodzeniem zrektyfikowany w Katowicach w 2002 r. przez firmę MPL

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Geodezji Górniczej

** Praca zrealizowana w ramach projektu badawczego nr 4T12E 05729

Katowice Sp. z o.o. Ostatnio spółdzielnie mieszkaniowe zgłaszają coraz więcej budynków do prostowania, szczególnie ma to miejsce wtedy, kiedy mieszkańcy bloków pragną wymieniać stare okna na nowe (wymaga to także spełnienia odpowiednich warunków, aby otrzymać gwarancję na wymienione elementy). Opracowano i w praktyce sprawdzono już różne metody prostowania coraz wyższych budynków. Można więc sądzić, że ta nowa metoda naprawy szkód górniczych będzie przedłużać wartość użytkową różnych budynków i budowli, toteż szczegółowe poznanie zachowania prostowanych budynków przed rektyfikacją i po rektyfikacji ma charakter ze wszech miar uzasadniony.

W niniejszej pracy autorzy przedstawili wyniki obserwacji wychylenia pięciokondygnacyjnego budynku mieszkalnego w Rudzie Śląskiej, zlokalizowanego nad kopalnią węgla kamiennego należącą do Rudzkiej Spółki Węglowej S.A., eksploatującą złożę systemem zawalowym. Pomiar zrealizowano trzema metodami geodezyjnymi. Drugim monitorowanym obiektem był jedenastokondygnacyjny blok zbudowany z wielkiej płyty znajdujący się nad zakończoną już eksploatacją kilkunastu pokładów należących do nieczynnej KWK Kleofas.

Ponadto zaprezentowano wyniki doświadczeń zmierzających do określenia stopnia przydatności technologii automatycznego skanowania laserowego przy wykorzystaniu panoramicznego skanera laserowego Callidus (firmy Callidus Precision System GmbH) oraz tachimetru skanującego 5503 DR 200 (Trimble) w procesie wyznaczania wychyleń obiektów rozmieszczonych na obszarach górniczych kopalń.

2. Przyczyny deformacji budowli na terenach górniczych oraz wybór metody ich monitoringu

Prowadzenie eksploatacji złoża pod terenami zagospodarowanymi wywołuje powstawanie szkód górniczych w obiektach budowlanych wskutek zmian geometrii podłoża. Najważniejszą przyczyną deformacji budowli jest zmiana nachylenia podłoża wywołana wpływami prowadzonej eksploatacji podziemnej. W przypadku niekorzystnej lokalizacji obiektu względem tworzącej się w czasie niecki obniżeniowej na powierzchni następuje wychylenie budowli (o kierunku zgodnym zazwyczaj z kierunkiem zmiany nachylenia powierzchni terenu), któremu w zależności od konstrukcji budynku oraz materiału, z jakiego został wykonany, mogą towarzyszyć poważne uszkodzenia w postaci spękań i zarysowań. Szczególnie odporne na zmiany własności podłoża okazują się konstrukcje monolityczne (żelbetowe), zapewniające dużą sztywność przestrzenną budowli, zaś bardziej podatnymi na uszkodzenia są struktury murowane (cegłane, pustakowe).

Dobór metod inwentaryzacji szkód w strukturze budowli uzależniony jest od rodzaju obiektu, sposobu pozyskania danych, ich wykorzystania, a także metody interpretacji danych i ilości obserwacji oraz charakteru zaistniałych deformacji, tj. punktowych lub strukturalnych (np. powłok żelbetowych zapór wodnych). Zazwyczaj geodezyjna rejestracja deformacji w budowlach podlegających wpływom eksploatacji podziemnej opiera się na wyznaczeniu całkowitych wychyleń poszczególnych krawędzi budowli (metodą fotogrametryczną) oraz określaniu (za pomocą niwelacji geometrycznej) zmian wysokości podłoża

i wybranych poziomów budynku. Sposób ten stanowi najprostszą metodę opisu zmian geometrii obiektu i jego układu przestrzennego. W niektórych przypadkach (wieże szybowe zawierające maszyny wyciągowe, kominy, chłodnie itp.) taki monitoring jest niepełny, nie oddaje w pełni zniekształceń związanych z działaniem dynamicznych sił zmiennych (parcie wiatru, zmiany nasłonecznienia, drgania podłoża itp.).

W niedalekiej przyszłości w procesach rejestracji zmian o charakterze zarówno statycznym, jak i dynamicznym ważną rolę odgrywać mogą w pełni automatyczne skanery laserowe. Ich wykorzystanie w realizacji konkretnych zadań geodezyjnych wymaga jednak wyznaczenia stopnia ich przydatności do określonych zadań oraz określenia warunków ich stosowalności. Pomiędzy pomiarami klasycznymi dotychczas realizowanymi a w pełni automatycznym przyszłościowym skanowaniem laserowym istnieje podstawowa różnica związana z metodą uzyskiwania informacji istotnych dla użytkownika oraz sposobu ich interpretacji.

Tachimetria umożliwia rejestrację kątów dyskretnych do dowolnie obranego przez obserwatora punktu, np. reprezentującego krawędź budynku. Zintegrowanie modułów kątomierczego i dalmierczego pozwala na bezpośrednią obserwację wybranej krawędzi określonej strefy budowli tylko z jednego stanowiska instrumentu, dostarczając jej charakterystyki w formie zbioru punktów o ściśle określonych współrzędnych przestrzennych XYH w dowolnie obranym układzie. W przypadku wszystkich dostępnych skanerów laserowych brak jest możliwości ingerencji operatora w proces pomiarowy, tj. kierunek emisji wiązki świetlnej (widzialnej lub podczerwieni). Przypadkowość względem skanowanych szczegółów sytuacyjnych (np. krawędzi) wymusza pozyskiwanie ich w sposób pośredni na etapie obróbki danych. O wartości użytkowej każdego instrumentu decydują, poza aspektami dokładnościowymi, także walory i możliwości oprogramowania tworzonego przez producentów dla celów obróbki danych przestrzennych. Znacząca rozdzielczość pomiarowa skanerów laserowych pozwala na szybką rejestrację ogromnej ilości punktów. W praktyce prędkość ta dla skanerów średniego zasięgu (tj. do 100 m) waha się w przedziale: od 100 punktów/sekundę (model Soisic koncernu Mensi Inc. z Francji) do ok. 27 000 punktów/sekundę (model Riegl). W związku z tym, właściwy dobór kąтового kroku skanowania do odległości od badanej bryły pozwala na uzyskanie znaczącego pokrycia powierzchni inwentaryzowanego obiektu. Gęstość pokrycia danej powierzchni umożliwia określenie stopnia deformacji strukturalnych powierzchni (błędy wykonawstwa budowlanego, odkształcenia ścian obiektu wywołane wpływami górniczymi) w odniesieniu do jej stanu pierwotnego.

Wielopunktowe pokrycie analizowanych powierzchni pozwala na minimalizację ewentualnych błędów pojedynczego pomiaru (zwłaszcza długości) w tworzonych opracowaniach. Poprzez półautomatyzację lub automatyzację na etapie przetwarzania danych, tj. wpasowywanie powierzchni, w tym płaszczyzn, w zaznaczone fragmenty chmury punktów możliwe jest:

- tworzenie dokumentacji technicznej zgodnie z obowiązującymi normami;
- tworzenie precyzyjnych modeli trójwymiarowych budowli oraz ich wirtualną prezentację;
- wykrywanie deformacji strukturalnych powierzchni topograficznej badanych segmentów budowlanych (ścian, okien, balkonów itp.).

Dla określenia stopnia przydatności skaningu laserowego w diagnostyce budowli przeprowadzono monitoring dwóch budynków przed i po rektyfikacji za pomocą różnych przyrządów.

Analizę wyników wychylenia pięcio- i jedenastokondygnacyjnego budynku mieszkalnego wykonano na podstawie powszechnie stosowanych dotychczas technik rejestracji tych zmian, do których zalicza się metody:

- **rzutowania punktów** najwyższych (pod okapami) określonej krawędzi na przyjęty poziom odniesienia – poziom zera budowlanego; pomiar wykonano zintegrowanym tachimetrem elektronicznym **Geodimeter 610 Serwo** w dwóch położeniach lunety;
- **biegunowe, bezzwierciadlane** w pomiarze kątoowo-liniowym instrumentem **Nikon NPL-352** poprzez obserwację poszczególnych krawędzi budynku względem baz pomiarowych (osnowy);
- **nowoczesnego skaningu laserowego** przy wykorzystaniu panoramicznego skanera laserowego **Callidus** (dla obiektu pięciokondygnacyjnego) i tachimetru skanującego **5503 DR 200 Trimble** (dla obiektu jedenastokondygnacyjnego), pozwalającego na pośrednie wyznaczenie wektorów wychyleń krawędzi inwentaryzowanych segmentów mieszkalnych.

Dla kontroli, wychylone krawędzie ścian budynku oraz okna i wybrane balkony przed rektyfikacją i po rektyfikacji pomierzono wymienionymi instrumentami metodą tachimetryczną. Dodatkowo odrzutowano na łatę ustawioną poziomo punkty leżące na krawędziach dla odpowiednich kondygnacji (przykładową krawędź pomierzoną różnymi metodami ilustrują wykresy na rys. 6). Zastosowanie różnych przyrządów pozwoliło określić dokładność oraz podać warunki stosowalności urządzeń skanujących do diagnostyki obiektów podlegających wpływom eksploatacji górniczej.

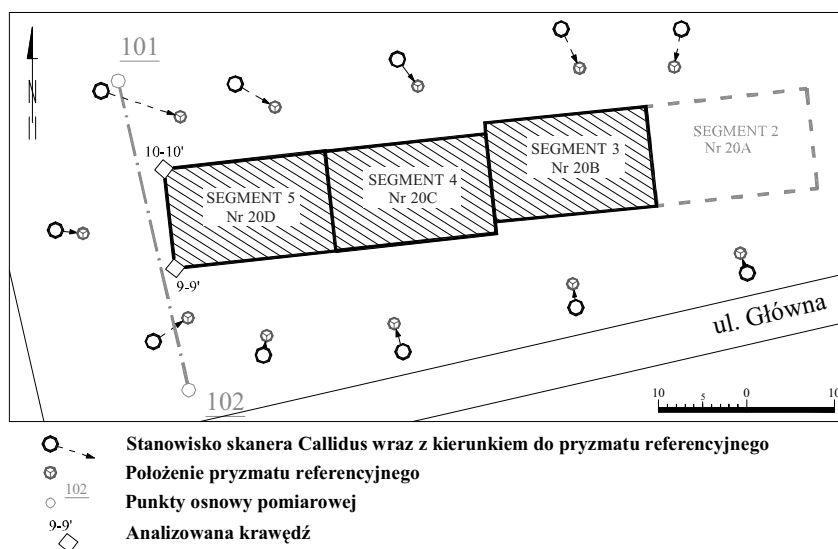
3. Budynek mieszkalny pięciokondygnacyjny – pierwsze pole testowe

Badany obiekt stanowiły trzy szeregowo rozmieszczone i zdylatowane segmenty murewanego budynku mieszkalnego (o rzucie prostym) w Rudzie Śląskiej (segmenty 3–5 na rys. 1). Wymiary poszczególnych brył bliźniaczych segmentów spełniają warunki dla zdefiniowania budynku jako obiektu zwartego [2].

Obiekt, zanim posadowiono go w terenie eksploatacji górniczej, nie został w żaden sposób zabezpieczony przed wpływami górniczymi (do chwili jego inwentaryzacji), o czym świadczy choćby szerokość szczelin dylatacyjnych (na poziomie kilku centymetrów). Zgodnie z obowiązującymi od 1975 roku przepisami [2], wielkość prześwitu przerwy dylatacyjnej powinna zagwarantować swobodę odkształceń poszczególnych sąsiadujących ze sobą segmentów we wszystkich kierunkach bez ich wzajemnego opierania się o siebie. Warunek ten nie został spełniony.

Pomiar skaningowy (przed rektyfikacją budynku) wykonano z 11 stanowisk instrumentu w oparciu o założoną wokół obiektu osnowę pomiarową, pozwalających na wyzna-

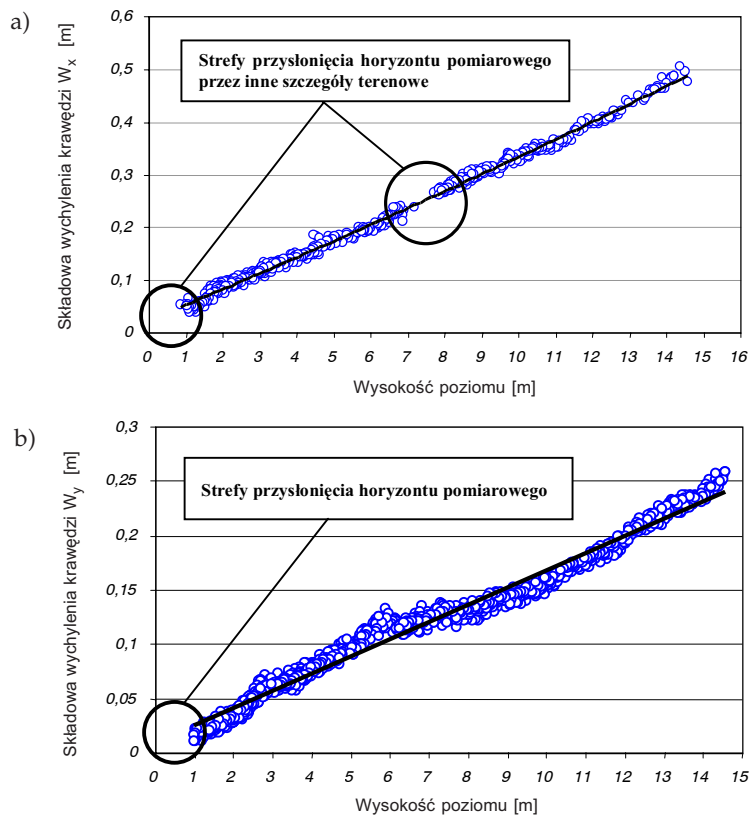
czenie wychyleń całkowitych wybranych (dostępnych) krawędzi pojedynczych zdylatowanych segmentów budynku. Pojedyncze skany zostały jednoznacznie zorientowane w przestrzeni na podstawie założonej i pomierzonej osnowy pomiarowej. Układ geometryczny punktów osnowy, stanowisk skanera i pryzmatów referencyjnych przedstawiono w układzie lokalnym na szkicu (rys. 1).



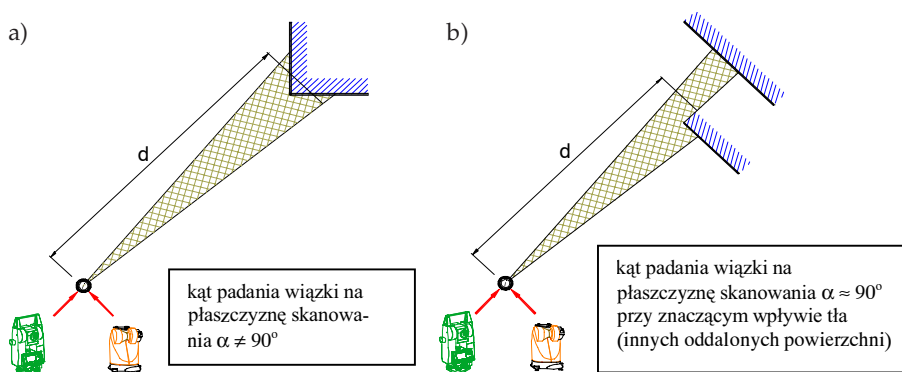
Rys. 1. Schemat rozmieszczenia punktów osnowy, stanowisk skanera Callidus oraz pryzmatów referencyjnych wokół inwentaryzowanego budynku

Przeprowadzone prace badawcze wykazały, iż z uwagi na rodzaj materiału i strukturę konstrukcji budynku, tj. ściany ceglano-pustakowe i stropy żelbetowe (przepony poziomych zwiększających sztywność przestrzenną konstrukcji budynku), generowanie krawędzi (wzdłuż całkowitej wysokości obiektu) na podstawie pojedynczych płaszczyzn wpasowywanych automatycznie w chmury punktów (wyselekcjonowanych punktów na całej wysokości w pobliżu szukanej krawędzi) wydaje się błędne z uwagi na krzywoliniowy charakter deformacji tego typu konstrukcji budowlanych. Budynek uległ zarówno nierównomiernemu wychyleniu, jak również niewielkiemu skręceniu, co wykazały wykresy wychyleń wybranych krawędzi segmentu nr 5 budynku opracowane na podstawie danych biegunowych obu metod laserowych, tj. tachimetrii i skaningu (rys. 2). Wyznaczenie składowych wektorów wychyleń krawędzi segmentów budynku oraz ich wypadkowych sporządzono graficznie w programie AutoCAD.

Wyniki pomiaru tachimetrycznego (wykonywanego za pomocą tachimetrów bezzwierciadlanych) pionowej krawędzi, w skrajnie niekorzystnych warunkach (gdy sytuacja terenowa nie pozwala na ustawienie instrumentu w linii przedłużenia jednej ze ścian) mogą być mniej dokładne od pomiarów skanerowych. Niekorzystny kąt padania wiązki na krawędź może wywołać zniekształcenie mierzonej długości, co obrazuje rysunek 3 [1].



Rys. 2. Przykłady rozkładu punktów wzdłuż krawędzi 9-9' segmentu nr 5 w płaszczyznach:
a) XH wraz z aproksymacją wielomianem drugiego stopnia śladu krawędzi budynku;
b) YH wraz z aproksymacją wielomianem drugiego stopnia śladu krawędzi budynku



Rys. 3. Przyczyny powstawania błędów pomiaru odległości wynikające z geometrii mierzonego elementu w stosunku do stanowiska tachimetru bądź skanera
Objaśnienia w tekście

Wielkość zniekształcenia zależna jest głównie od stopnia rozbieżności wiązki (stożkowy charakter ogniskowanej wiązki, który ogranicza zasięg pomiaru). W praktyce wraz z odległością powierzchnia wiązki rośnie. Stopień rozbieżności wiązki uzależniony jest od rozmiarów soczewki ogniskującej nadajnika, zmieniając się odwrotnie proporcjonalnie do jej średnicy. Dużą dokładność pomiaru obiektów wysokich (w zakresie zasięgu pomiaru instrumentu) testowany skaner Callidus zawdzięcza zastosowaniu unikatowych modułów, tj. kompensacyjnego i magnetycznego oraz algorytmów korekcji obserwacji kątowych o wielkość wychylenia osi pionowej obrotu instrumentu. Możliwe jest zatem dzięki współpracy kompensatora dwuosowego o dokładności $\pm 0,005^\circ$ ($< 2^\circ$) oraz wskazań elektronicznego kompasu magnetycznego (orientującego wyniki pomiaru w przestrzeni) automatyczne wprowadzanie poprawek do obserwacji pomiarowych.

4. Wykorzystanie firmowego oprogramowania 3D-Extractor w procesie tworzenia modeli trójwymiarowych

Ogromną zaletą zestawów skanujących (w tym zestawu Callidus firmy Callidus Precision Systems GmbH wyposażonego w oprogramowanie 3D-Extractor) są programy do obróbki danych przestrzennych pozyskiwanych na etapie pomiaru. Specjalistyczne oprogramowanie umożliwia obróbkę, filtrację i przetwarzanie danych trójwymiarowych otrzymywanych w formie chmury punktów. Główny nacisk kładzie się w programie na możliwości przekształceń chmur punktów w geometryczne modele powierzchniowe oparcia o narzędzia matematyczne. Wsparcie topologiczne przy tworzeniu modeli 3D opiera się na algorytmach obliczeniowych wykorzystujących sztuczną inteligencję oprogramowania, gwarantujących dużą dokładność aproksymacji powierzchni (płaszczyzn, walców, kul, stożków) w wyselekcjonowane zbiory punktów.

Proces konwersji chmur punktów do postaci modelowej, tj. płaszczyznowej, siatkowej i kubaturowej jest parametryzowany. Każda z tworzonych powierzchni zostaje zapisana w wewnętrznej bibliotece pliku, zaś jej zapis zostaje poprzedzony etapem parametryzacji. Polega on na ściślejszej charakterystyce powierzchni, na którą składają się:

- nazwa powierzchni, tzw. ID;
- procentowy udział punktów definiujących tworzoną geometrię powierzchni przy założeniu wysokiej dokładności jej wpasowania;
- dokładność wpasowania powierzchni dana odchyleniem standardowym;
- wartość parametru Wrapping-Indicator®, który stanowi wiarygodny wskaźnik charakteryzujący trójwymiarową dokładność aproksymacji punktów XYH względem generowanej powierzchni;
- liczba zaznaczonych przez użytkownika punktów do analizy.

Analizy statystyczne oparte na wskaźniku Wrapping-Indicator® pozwalają w przypadku nierównych powierzchni, np. ścian, na identyfikację obszarów i eliminację punktów odbiegających odległością od generowanej powierzchni (np. płaszczyzny). Dzięki takiemu

zabiegowi odległości poszczególnych wybranych punktów od tworzonej i jednoznacznie zdefiniowanej płaszczyzny są najmniejsze.

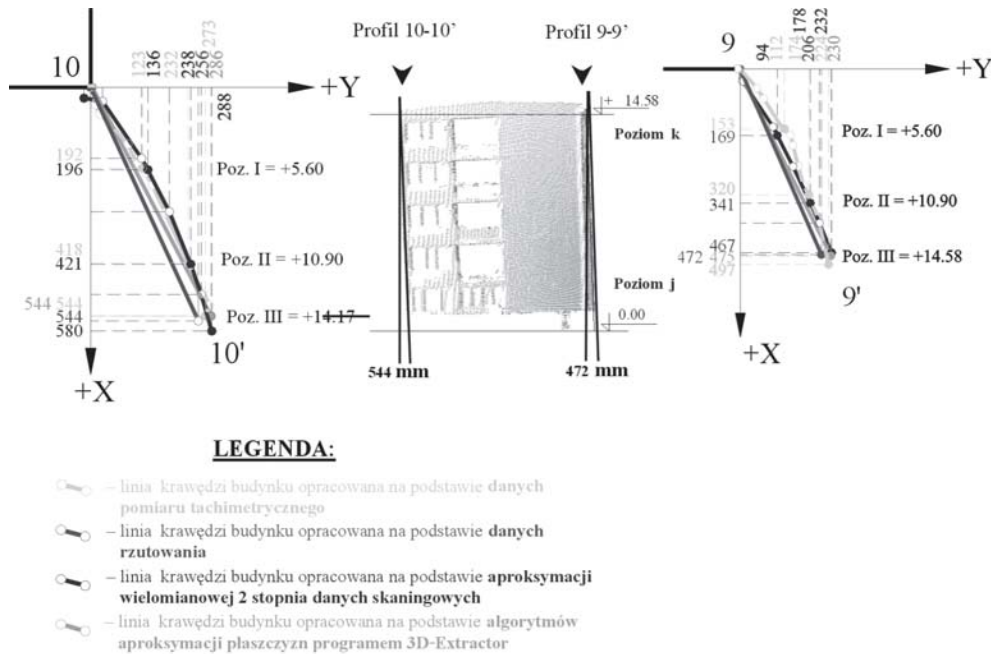
Taki sposób pomiaru i analizy danych pokrywających sąsiednie płaszczyzny ścian, których przecięcie, tj. ślad, stanowi szukaną wielkość, stanowi przewagę z punktu widzenia dokładności nad metodą tachimetrii bezzwierciadlanej. Pozwala bowiem na pełną charakterystykę mierzonych ścian budynku i wyznaczenie rzeczywistego przebiegu krawędzi budowli. Wielokrotne pokrycie określonej powierzchni punktami i działanie na powierzchniach (płaszczyznach) wpasowywanych (aprosymowanych) w określone przez użytkownika grupy punktów pozwalają na ograniczenie w tworzonych opracowaniach wpływu pojedynczych błędów pomiaru odległości do powierzchni. Zwłaszcza w przypadku pomiaru do powierzchni silnie skrzywionych względem kierunku padania wiązki, automatyzacja procesu obróbki i praca na powierzchniach (płaszczyznach) niweluje ich wpływ. Badania prowadzone w ramach pracy [1] potwierdziły, że pojedyncze błędy pomiaru odległości do elementów skrzywionych przy wykorzystaniu panoramicznego skanera laserowego Callidus mogą osiągać wartość nawet do ± 25 mm.

Jednopłaszczyznowe wpasowanie w daną chmurę punktów reprezentującą przykrawędziowy obszar ściany w przypadku deformacji ściany o charakterze krzywoliniowym może powodować nieznaczne zniekształcenia prawdziwej wielkości składowej wychYLENIA W_x lub W_y . Z uwagi na murowany rodzaj konstrukcji zaobserwowano odkształcenia o ciągłym, krzywoliniowym charakterze (przykład rozkładu punktów dla krawędzi 9-9' przedstawia rys. 2). Dobrym rozwiązaniem opisującym w sposób właściwy zjawisko byłoby wprowadzenie wielopłaszczyznowości dla wybranych ścian. Rozbicie jednej płaszczyzny na wiele mniejszych jednostkowych i stycznych pozwoliłoby na minimalizację błędu całkowitego wychYLENIA krawędzi W_{3D} . Przeprowadzone doświadczenia dowiodły, że możliwe jest uzyskanie wysokiej dokładności przy zastosowaniu narzędzi statystycznych w układzie 2D.

Pomiary tachimetryczno-skaningowe wykonano dla skrajnie niekorzystnych warunków geometrycznych. Różnice wynikające z wielkości całkowitych wychYLEN W_{3D} kształtują się na poziomie średnio około 2 cm. Są one widoczne zwłaszcza pomiędzy skanowaniem i wykorzystaniem narzędzi statystycznych a metodą tachimetrii bezzwierciadlanej oraz rzutowania. Wynika to przede wszystkim z nieciągłości danych dla pełnych profili krawędziowych pomiędzy poziomami j i k (rys. 4). Pomiar skaningowy wykonano przy częściowym przysłonięciu horyzontu pomiarowego innymi szczegółami terenowymi w przedziale wysokości 0÷2 m, co spowodowało nieznaczne zniekształcenia w modelowaniu funkcji. Gwarancją uzyskania precyzyjnego opisu matematycznego zniekształceń jest całkowite odsłonięcie obszarów przykrawędziowych na pełnej wysokości budynku podlegającej analizie. W przypadku wektorów jednostkowych (pomiędzy poziomami pośrednimi) analiza pozwoliła uzyskać zadowalającą zgodność wyników (co do wartości wektorów i kształtów krzywizn) z obu metod laserowych.

Oparcie pomiarów skaningowych na punktach osnowy pomiarowej pozwala także wyznaczyć zmiany długości poszczególnych czołówek wraz z wysokością, które w przypadku opisywanego budynku ulegały zmianie nawet o 7,2 cm (ściana szczytowa segmentu

nr 5 od strony zachodniej). Analiza odkształceń w lokalnym układzie współrzędnych, zgodnym z przebiegiem krawędzi ścian, umożliwia matematyczny opis deformacji jednostkowych W_x i W_y wzdłuż osi X i Y.



Rys. 4. Wykresy wychYLENIA krawędzi budynku oraz wizualizacja chmury punktów ściany szczytowej segmentu nr 5 od strony zachodniej

Jeżeli składowe wychYLENIA W_{3D} opisują zależności:

$$W_x = f_x(H_j, H_k) \quad (1)$$

$$W_y = f_y(H_j, H_k) \quad (2)$$

gdzie:

f_x, f_y – funkcje opisujące charakterystykę deformacji powierzchni ścian w obrębie krawędzi w kierunkach zgodnych z osiami układu,
 H_j, H_k – wysokości, pomiędzy którymi określamy wielkości składowe wektora wychYLENIA,

wówczas

$$W_x = f_x(H_k) - f_x(H_j) \quad (3)$$

$$W_y = f_y(H_k) - f_y(H_j) \quad (4)$$

Stąd wielkość wektora wychylenia W_{3D} pomiędzy poziomami j i k określa zależność

$$W_{3D} = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (5)$$

W analizach skupiono się na wyznaczeniu wychyleń jednostkowych (pomiędzy wybranymi poziomami) i całkowitych, gdzie:

j – poziom przyjętego zera budowlanego, tj. $H_j = 0,00$ m,

k – poziom wyznaczony w oparciu o najwyższy punkt krawędzi.

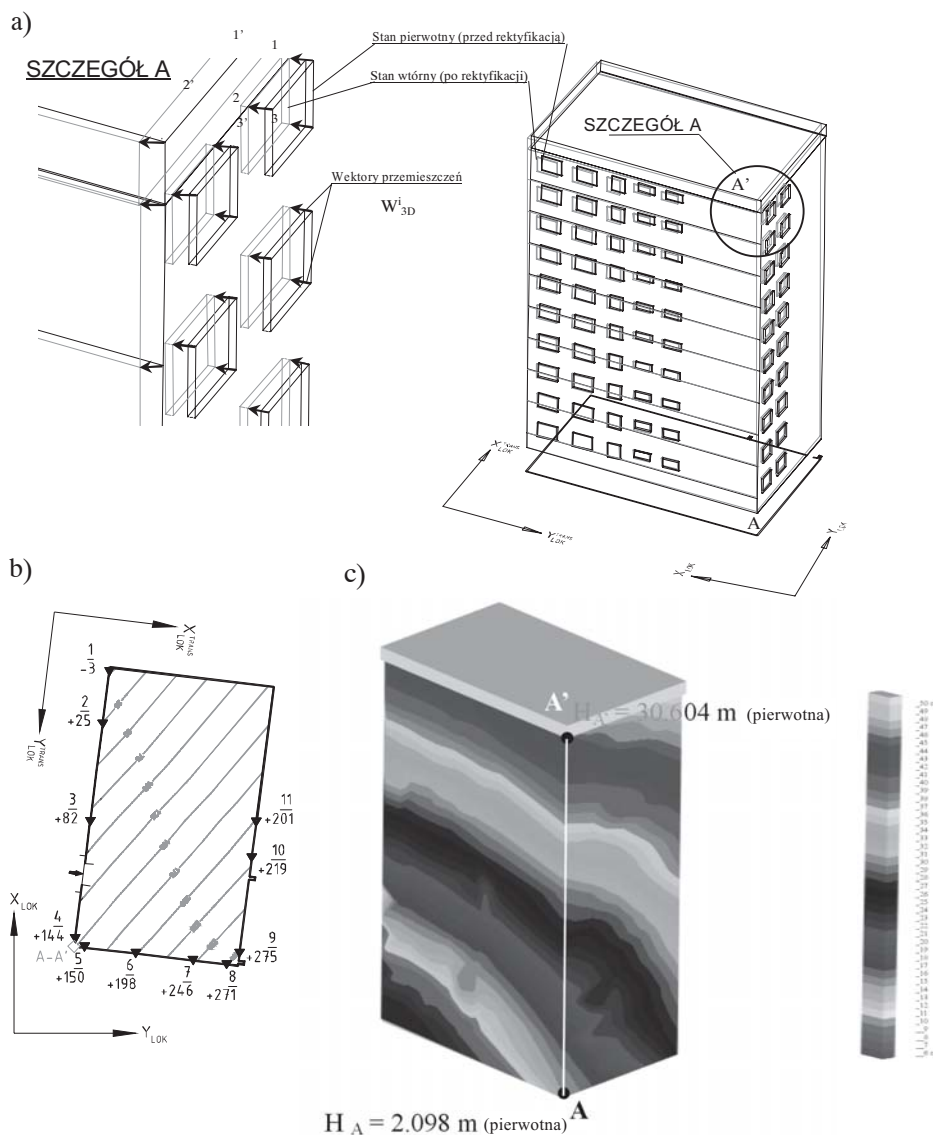
5. Budynek mieszkalny jedenastokondygnacyjny – drugie pole testowe

Budynek dwusegmentowy, z którego tylko jeden segment stanowił pole testowe, przedstawiono na rysunku 5. Badany obiekt posadowiony jest na fundamencie, który stanowi dwukierunkowo zbrojona płyta pozioma o grubości 60 cm. Na żebrach wchodzących w skład płyty fundamentowej ustawione są płyty ściennie kondygnacji przyziemia. Wymiary w rzucie poziomym wynoszą 19,2×11,0 m, zaś wysokości poszczególnych kondygnacji 2,8 m. Obiekt stanowi przykład budownictwa wielkopłytkowego, którego elementami są jednowarstwowe, żelbetowe pełne płyty ściennie o grubości 20 cm. Dodatkowo zewnętrzne powierzchnie ściennie osłonięto warstwą elewacyjną o grubości około 6 cm [3].

Na przykładzie omawianego obiektu autorzy zwrócili uwagę na możliwość stosowania tachimetru skanującego w zadaniach inwentaryzacji stopnia deformacji budowli (w tym zwłaszcza wysokich) przy zachowaniu wysokiej dokładności i dużej liczby danych określanych bezpośrednio w terenie w postaci punktów o współrzędnych przestrzennych. Analogicznie jak w przypadku pierwszego pola testowego metodami porównawczymi do skanowania były metody rzutowania oraz biegunowa (bezpośrednia obserwacja kątowno-liniowa tylko krawędzi budynku).

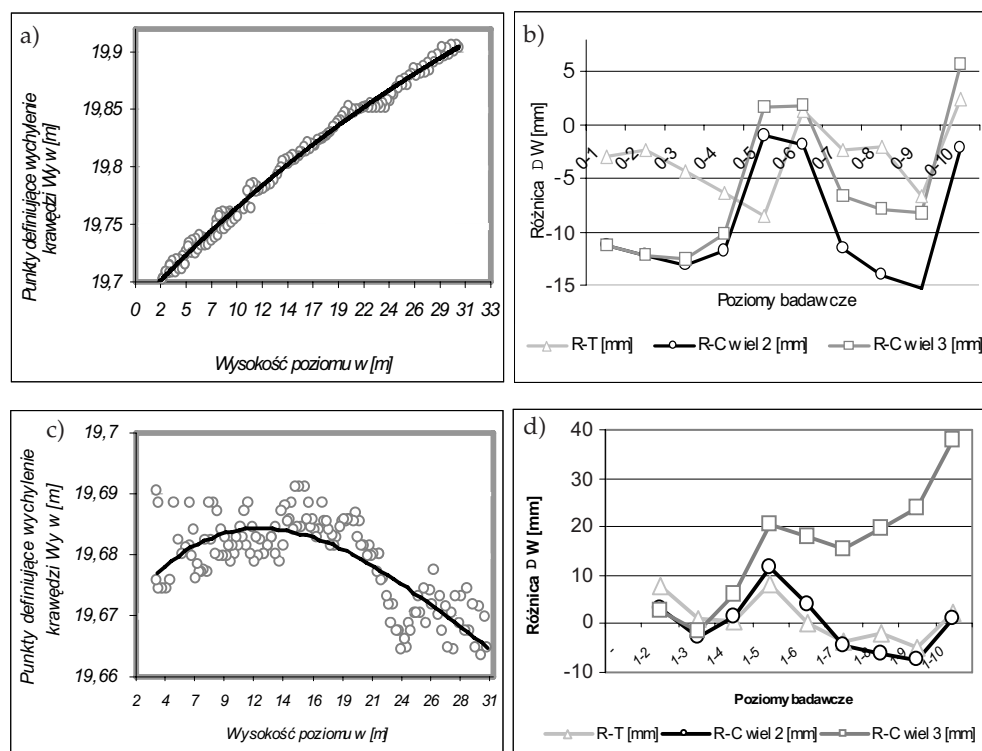
Opierając się na założonej bazie pomiarowej, wykonano za pomocą trzech metod geodezyjnych pomiar pionowości wybranych krawędzi badanego obiektu. Niezależnie od rodzaju instrumentu skanującego pokrycie powierzchni obiektu w sąsiedztwie analizowanej krawędzi zbiorem punktów pozwala unikać na etapie obróbki danych niejednoznaczności interpretacyjnej. Autorzy zastosowali podobnie jak w przykładzie pierwszym metodykę obliczeń zgodną ze wzorami (1)–(5). Przyjęcie procedur aproksymacji pozwala na minimalizację wpływu błędów pojedynczych punktów pomiarowych na końcowy efekt analiz. Ponadto model ten pozwala na filtrację pozyskanych z pomiaru danych w przyjętym układzie współrzędnych $XY^{LOKTRANS}$, a także wyznaczenie stref lokalnych deformacji. Należy zaznaczyć, że nie zawsze inwentaryzowane krawędzie wykazują ciągłość przebiegu, np. z uwagi na uszkodzenia struktury muru. Wówczas zastosowanie metod pośrednich wyznaczenia przebiegu krawędzi, a tym samym parametru jej wychylenia jednostkowego lub całkowitego wydaje się najwłaściwsze. Prezentowany na rysunku 5 przykład obrazuje udokumentowany przy wykorzystaniu tachimetru skanującego 5503 DR 200 Trimble stan geometrii budynku przed rektyfikacją i po rektyfikacji dla składowej wychylenia W_y wybranej krawędzi budynku A–A'.

Niwelacja punktów wysokościowych zasygnalizowanych na powierzchni muru poziomym piwnic pozwoliła dodatkowo uzyskać informację o końcowej wartości zmiany wysokości poszczególnych stref budynku w wyniku jego rektyfikacji (rys. 5b).



Rys. 5. Przykład analizy pola przemieszczeń budynku jedenastokondygnacyjnego w wyniku rektyfikacji: a) model przestrzenny budynku w stanie pierwotnym i wtórnym; b) zmiana wysokości reperów roboczych w wyniku rektyfikacji budynku (poziom piwnic); c) graficzna interpretacja przemieszczeń w przestrzeni 3D obserwowanych punktów dwóch ścian (długość wektora przemieszczenia 0,01 m = prążek w przyjętej skali barw)

Niewątpliwie zaletą wykorzystanego przez autorów tachimetru 5503 DR 200 jest praca zarówno w trybie pomiaru pojedynczego – manualnego (pomiar kątów dyskretnych), jak również sesyjnego (automatyczne skanowanie). Łatwa zmiana trybu pracy pozwala na rejestrację tylko niezbędnych danych dla ostatecznego opracowania wyników, co często upraszcza proces obróbki danych oraz ich właściwą selekcję. Dwukrotny pomiar bezzwierciadlany wybranych punktów przed i po rektyfikacji (punkty definiujące krawędzie ścian, wnęk okiennych itp.) umożliwił uzyskanie informacji przestrzennej o wielkości wektorów przemieszczeń, a tym samym mechanizm przebiegu procesu rektyfikacji. Uzyskanie kompleksowych danych przestrzennych wektorów jednostkowych Wi3D dla analizowanych dwóch wybranych ścian budynku pozwoliło na opracowanie modelu przestrzennego rozkładu zaistniałych zmian (rys. 5c). Rozkład przemieszczeń stworzył podstawę wyznaczenia modelu przestrzennego zmian układu geometrycznego bryły budynku. Na ścianach dają się zauważyć lokalne nieregularności w deformowanej bryle budynku.



Rys. 6. Przykład rozkładu pomierzonych punktów w obrębie krawędzi A-A': a) i b) przed rektyfikacją; c) i d) po rektyfikacji budynku; porównanie wyznaczenia wielkości wychylenia krawędzi A-A' za pomocą metod: R – rzutowania; T – tachimetrii bezzwierciadlanej (bezpośrednia obserwacja krawędzi), C – skanowania obszarów przykrawędziowych (C wiel 2 – aproksymacja wielomianem 2. stopnia; C wiel 3 – aproksymacja wielomianem 3. stopnia)

Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku pomiarów kątoowo-liniowych przy wykorzystaniu instrumentów bezzwierciadlanych nie bez znaczenia ma sposób pozyskania danych i metodyka ich opracowania. W przypadku bezpośredniego rejestrowania przebiegu krawędzi obiektu (sytuacja jak na rys. 3a) otrzymujemy przestrzenne dane o wysokiej dokładności (rzędu pojedynczych milimetrów). Niekorzystne padanie plamki lasera jak na rysunku 3b, może powodować znaczące zniekształcenie długości na poziomie nawet 5 cm, co wynika z wpływu tła na czas przelotu impulsu i fluktuację czoła impulsu odbitego. Zastosowanie funkcji automatycznego skanowania ogranicza wpływ tła na dokładność mierzonej długości, ale krawędź wyznaczamy w sposób pośredni na etapie obróbki danych. Przykład rozkładu punktów składowej W_y badanej krawędzi A-A' (z rys. 5) oraz rozkładu ich błędów w przyjętych modelach aproksymacji przedstawiono na rysunku 6.

6. Podsumowanie

Sytuacja terenowa (zabudowa, szata roślinna itp.) nie zawsze pozwala na stosowanie prostych i skutecznych metod diagnostyki budynków zlokalizowanych na terenach górniczych (poddanych wpływom eksploatacji). Metoda rzutowania na łatę w przypadku obiektów wysokich wymaga dość dużego, wolnego przedpoła na ustawienie instrumentu w linii przedłużenia badanej ściany budynku. Nie zawsze obserwatorzy posiadają przyrządy łamiące zwiększające zakres obserwacji w płaszczyźnie pionowej, co często uniemożliwia stosowanie tej metody. Z kolei metoda fotogrametryczna, choć zapewniająca dużą dokładność, na etapie obróbki zdjęć wydaje się zbyt czasochłonna. Skanowanie laserowe za pomocą skanera jest metodą szybką i dokładną, dostarcza pełną diagnostykę badanej bryły. Ma jednak tę zasadniczą wadę, że skanery są jeszcze bardzo drogie, stąd mało popularne. Tachimetry skanujące znacznie wydłużają czas pomiaru, chociaż także dostarczają materiał do kompleksowych badań. Z tego powodu każdy obiekt należy traktować indywidualnie i do określonego celu badań dobrać metodykę jego badań.

Przeprowadzone analizy wybranych krawędzi pionowych obydwu budynków potwierdziły krzywoliniowy charakter zmian. Krawędzie budynków wolne od bezpośredniego wpływu (parcia) budynków sąsiednich i zlokalizowane od strony największych obniżzeń znacznie bardziej ulegają lokalnym deformacjom. W przypadku krawędzi segmentów współpracujących z innymi sąsiednimi obiektami lub podpieranymi przez nie, zaobserwowano przebieg bardziej regularny, zbliżony do liniowego. Doświadczenia wykazały, że w wielu przypadkach określenie całkowitych wartości wychyleń na podstawie danych skaningu i zaprezentowanych analiz dało wysoką dokładność. Zasadniczo jednak najlepszy opis deformacji pozwalający z dużą precyzją wyznaczyć wektory wychyleń całkowitych, jak również jednostkowych (międzypoziomowych) krawędzi gwarantuje funkcja wielomianu 2. stopnia. Gwarancją uzyskania wysokiej dokładności opisu matematycznego krawędzi jest pełne odsłonięcie stref przykrawędziowych budynku dla zadanego przedziału wysokości.

Literatura

- [1] Gawałkiewicz R.: *Nowoczesne technologie geodezyjne w inwentaryzacji wielkokubaturowych obiektów podziemnych*. Kraków, AGH 2005 (praca doktorska niepublikowana)
- [2] Instrukcja 364/2000: *Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych*. Warszawa, Instytut Techniki Budowlanej 2000
- [3] Niemiec T.: *Pierwsza w Polsce rektyfikacja wysokiego budynku mieszkalnego z użyciem siłowników hydraulicznych*. Materiały konferencyjne „Ochrona środowiska na terenach górniczych u progu integracji z Unią Europejską”, Szczyrk 2002