

Rafał Gawałkiewicz*

Przykład skanowania laserowego w monitoringu obiektów powłokowych**

1. Wstęp

Szczegółowy opis geometrii wszelkiego rodzaju obiektów i budowli inżynierskich może być w chwili obecnej wykonywany za pomocą automatycznych instrumentów geodezyjnych, tj. tachimetrów skanujących i skanerów laserowych, które dostarczają dużej liczby precyzyjnych danych w formie chmur punktów w rzeczywistej skali (1:1) i czasie rzeczywistym. Wielopunktowe pokrycie powierzchni mierzonego obiektu pozwala na rejestrację jego geometrii lub zmian następujących w określonym czasie. Jednak tak jak w przypadku zobrazowania cyfrowego metodą fotogrametryczną (dane przyjmują postać pikseli), tak i w przypadku skaningu laserowego otrzymujemy chmury punktów o zdefiniowanych współrzędnych przestrzennych. Obie metody zatem dostarczają nieuporządkowanych informacji, które muszą być przetworzone, aby uzyskać użyteczne informacje. Skanowanie laserowe polega na wyznaczeniu współrzędnych punktów definiujących geometrię inwentaryzowanej powierzchni na podstawie mierzonych kątów: poziomego i pionowego (względem kierunków referencyjnych) oraz odległości. Należy jednocześnie zaznaczyć, że kąty te mają charakter wielkości dyskretnych, co oznacza przypadkowość kierunku emisji impulsów świetlnych emitowanych przez układ dalmierczy instrumentu (niekoniecznie krawędzi obiektu).

W rzeczywistości przypadkowość kierunku emisji impulsów świetlnych nie stanowi większego problemu na etapie ich wykorzystania w analizach zmian geometrii inwentaryzowanych budowli oraz budowania ich modeli wirtualnych. Zastosowanie narzędzi graficznych opartych na specjalistycznych algorytmach obliczeniowych pozwala na zamianę modeli punktowych na czytelne postaci geometryczne oddające w pełni charakter i formę inwentaryzowanych budowli, uła-

* Katedra Ochrony Terenów Górniczych, Geoinformatyki i Geodezji Górniczej, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Praca wykonana w ramach projektu badawczego KBN 4 T12E 05729

twiając tym samym interpretację danych oraz zjawisk towarzyszących im i oddziałujących na nie. Z uwagi na znaczącą kubaturę, delikatną konstrukcję oraz funkcje, jakie pełnią w procesach przemysłowych, na uwagę zasługują budowle powłokowe, tj. chłodnie kominowe, kominy, zbiorniki cieczy i gazów itp.

Konieczność ich utrzymania w bezawaryjnym trybie pracy, jak również kontrola procesu budowlanego oraz wielkości odkształceń powstających już na etapie wznoszenia bądź w trakcie eksploatacji wymusza stosowanie szeregu metod geodezyjnych i fotogrametrycznych do dokumentacji tych zmian w czasie [7].

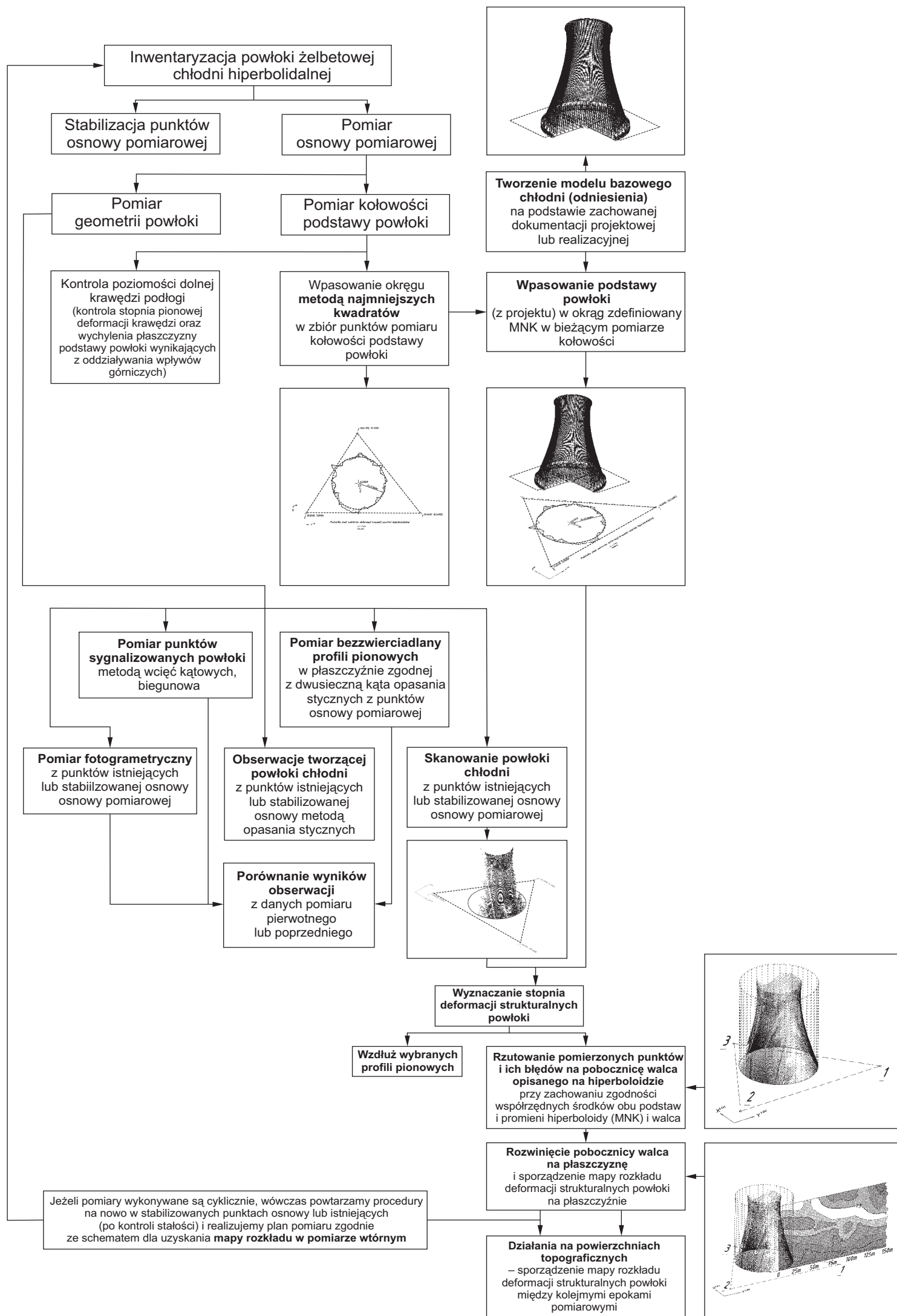
W artykule przedstawiono wyniki skanowania laserowego żelbetowej powłoki hiperboloidalnej chłodni (zlokalizowanej na terenie Elektrociepłowni „Kraków”), zaproponowano sposób analizy tych danych oraz porównano wyniki uzyskane dzięki zastosowaniu dwóch różnych instrumentów laserowych (skanera panoramicznego GX i tachimetru skanującego firmy Trimble) przy zachowaniu tego samego algorytmu analitycznego obliczeń.

2. Propozycja metodyki obliczeniowej określenia wielkości deformacji żelbetowego płaszcza chłodni

Wyróżnikami budowli żelbetowych typu powłokowego wznoszonych przy zachowaniu materiałooszczędnych technologii budowy są odmienna geometria konstrukcji oraz wielkokubaturowy charakter bryły przy zachowaniu lekkich konstrukcji.

Czynniki te decydują o tym, że zarówno w procesie wznoszenia, jak również w okresie eksploatacji niezwykle ważny jest monitoring określonych elementów budowli w celu zapewnienia jej bezpieczeństwa. Zazwyczaj uzyskanie pełnej charakterystyki zmian geometrii obiektu (w tym wypadku chłodni hiperboloidalnej) gwarantuje wykorzystanie kilku niezależnych metod pomiarowych. Innego podejścia analitycznego i narzędzi pomiarowych z uwagi na oddziaływanie czynników zewnętrznych i wielkość zmian (rzęd kilku milimetrów) wymaga monitoring poziomu fundamentowego i okien wentylacyjnych, odmiennego zaś – wyznaczenie rozkładu zniekształceń samej powłoki żelbetowej chłodni (rzęd nawet kilkudziesięciu centymetów). Warunkiem koniecznym bezawaryjnej pracy chłodni w czasie jej użytkowania przy założeniu maksymalnego obciążenia jest dotrzymanie ściśle określonych założeń modelu geometrycznego zgodnie z dokumentacją projektową.

Sprawdzenie geometrii chłodni możliwe jest dzięki metodom geodezyjnym lub fotogrametrycznym podczas okresowej inwentaryzacji, której zadaniem jest wyznaczenie aktualnego kształtu, położenia i wymiarów budowli. Dobór metodyki pomiarowej musi uwzględniać ograniczenia w dostępie do poszczególnych elementów obiektu, jak również rzeczywistą dokładność zastosowanej techniki inwentaryzacyjnej, adekwatną do przewidywanych wielkości deformacji.



Rys. 1. Schemat analizy danych skaningowych

Z uwagi na to, że chłodnie żelbetowe są obiektami stosunkowo młodymi, dostęp do dokumentacji projektowej nie powinien stanowić przeszkody, zwłaszcza że obowiązujące przepisy obligują przedsiębiorcę do przechowywania tego typu dokumentacji w archiwum zakładowym. Stąd obliczenie aktualnych i wiarygodnych odchyłek kształtu i wymiarów można uzyskać, porównując uzyskane z pomiaru dane z założeniami projektowymi, a ściślej – z modelem teoretycznym.

Wyznaczenie wielkości odchyłek geometrii powłoki na podstawie pomiaru inwentaryzacyjnego po dłuższym okresie eksploatacyjnym pozwala ocenić stopień bezpieczeństwa konstrukcji chłodni hiperboloidalnej. Zatem skanowanie laserowe dostarczające dużej liczby danych punktowych definiujących rzeczywisty kształt powłoki zalicza się do kompleksowych pomiarów inwentaryzacyjnych, umożliwiających jej wszechstronną ocenę stanu technicznego.

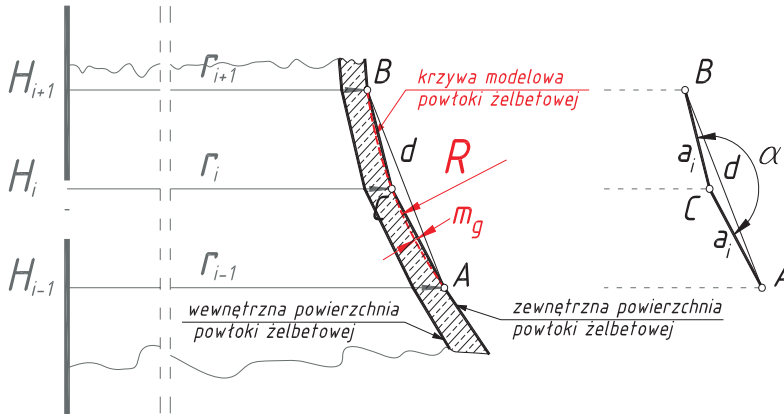
Dotychczas stosowane metody pomiaru [3]: wcięcia przestrzennego, otaczających styčných, biegunowa (bezwierciadłana), fotogrametryczna, wymagają określonej przestrzeni roboczej wokół obiektu. Warunek ten nie zawsze może być spełniony z uwagi na charakter zabudowy i przeszkody wokół mierzonej budowli sprawiające trudności w doborze stanowisk obserwacyjnych.

Technika pomiaru bezwierciadłanego wydaje się doskonałą metodą w tego typu zadaniach pomiarowych, zważywszy na pełną automatyzację pomiaru, jaką oferują skanery laserowe oraz szereg modeli tachimetrów skanujących. Nowa generacja tachimetrów skanujących i skanerów laserowych, wyposażonych w zintegrowane z układami dalmierzczymi kamery cyfrowe, umożliwiała wykonywanie zdjęć obiektów oraz na ich podstawie deklarację obszarów pomiaru na ekranie kontrolera (tachimetry) lub bezpośrednio na monitorze komputera (skanery). W praktyce istnieje możliwość ustawiania instrumentów w bliskim sąsiedztwie mierzonego obiektu, co zapewniają prezentowane w artykule instrumenty. Ponadto ich maksymalny zasięg pomiarowy predestynuje je do zastosowania w tego typu zadaniach inwentaryzacji geodezyjnych, nawet obiektów o tak znaczących wymiarach (a zwłaszcza wysokości) jak chłodnie hiperboloidalne. Na rysunku 1 (na wklejce) przedstawiono schemat blokowy metodyki opracowania dokumentacji geodezyjnej na podstawie analizy wielopunktowych zbiorów danych pochodzących ze skanowania laserowego.

Zagęszczenie punktów obserwacji w dolnej strefie powłoki, tj. strefie przykrawędziowej powłoki pozwala za pomocą aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów (MНК), wyznaczyć parametry okręgu definiującego podstawę powłoki. To z kolei stanowi podstawę złożenia modeli: teoretycznego (z projektu) i rzeczywistego (z pomiaru). Dodatkowo taki sposób analizy zapewnia kontrolę geometrii podstawy, tj. kołowości.

Inwentaryzacji podlega zewnętrzna powierzchnia powłoki, która nie jest hiperbolą projektowaną. Matematyczny opis uzyskuje wewnętrzna powierzchnia

chłodni, niedostępna podczas prowadzenia inwentaryzacji geodezyjnych w trakcie jej eksploatacji. Specyficzna budowa żelbetowego płaszcza złożonego z szeregu ściętych stożków (przypominających współosiowe pierścienie) może stanowić podstawę uproszczenia modelu w fazie analizy stopnia jego deformacji. Analizowana chłodnia zbudowana jest z 93 pierścieni o wysokości 1 m każdy, co nasuwa wniosek, iż linia pionowego przekroju odwzorowana jest w formie linii łamanej (rys. 2).



Rys. 2. Sposób analizy danych – różnice wynikające z przyjętego modelu powłoki:

$$m_g - \text{błąd generalizacji modelu promień krzywizny: } R = \frac{d}{2 \sin \alpha}$$

Pozostałe objaśnienia w tekście

Wynika to także z technologii budowy powłoki, tj. kształtu form płytowych stosowanych szalowań (rys. 2). Przyjęcie modelu generalizacji w postaci linii łamanej opisującej przebieg tworzącej uzasadnia zależność

$$m_g = \frac{d}{2 \sin \alpha} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{d^2}{\sin^2 \alpha} - a_i^2} \quad (1)$$

gdzie:

- d – odległość pomiędzy skrajnymi punktami definiującymi krzywiznę,
- α – kąt pomiędzy dwoma sąsiednimi odcinkami definiującymi krawędź powłoki,
- a_i – długości odcinków tworzących profil zewnętrzny przekroju powłoki (zgodnie z projektem).

W wypadku krzywizn inwentaryzowanego obiektu błąd m_g waha się w przedziale wartości 0,0÷3,6 mm (średnia wartość 1,0 mm). Tylko dla prezentowanych

w artykule instrumentów, tj. VX i GX firmy Trimble, i przy zbliżonych dokładnościach pomiaru odległości wielkość błędu m_g zawiera się w granicach błędu pomiarowego obu instrumentów ($GX \pm 3,6 \text{ mm} / 150 \text{ m}$, $VX \pm 3 \text{ mm}$).

3. Porównanie wyników wyznaczenia parametrów podstawy żelbetowej powłoki

W przeprowadzonych eksperymentach podstawę powłoki jako elementu dopasowania projektu do rzeczywistego modelu zdefiniowano dwukrotnie, wykorzystując do tego celu dwa różne instrumenty pomiarowe, tj. elektroniczny tachimetr bezzwierciadlany TCR Leica oraz skaner panoramiczny GX Trimble. Dla potwierdzenia słuszności wykorzystania prezentowanego na rysunku 2 (na wklejce) algorytmu analizy i obróbki danych pomiarowych, wyznaczenie parametru fizycznego podstawy, tj. promienia podstawy R_p , przeprowadzono na podstawie danych punktowych (nawiązanych do osnowy pomiarowej) różniących się liczebnością zbioru danych oraz kątem środkowym mierzonej krawędzi. Uzyskane wielkości szukanego parametru zestawiono w tabeli 1. Wynika z nich, że niezależnie od rodzaju pomiaru (manualny lub automatyczny) oraz długości kątowej obserwowanej krawędzi uzyskuje się wysoką dokładność definiowanej wielkości R_p , a także dużą zgodność wyznaczanych wartości szukanego parametru. Pokrycie strefy krawędziowej dużą liczbą punktów tylko w ograniczonym zakresie (dla kąta środkowego $\delta \approx 144^\circ$) również pozwala wyznaczyć z wysoką precyzją metodą najmniejszych kwadratów szukany promień podstawy. Metoda najmniejszych kwadratów daje doskonałe rezultaty w przypadku dużej ilości danych. Zwiększenie liczby obserwacji pozwala częściowo niwelować wpływy lokalnych deformacji na końcowy wynik aproksymowanych parametrów, o czym świadczą wyniki analizy zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie promieni podstawy powłoki wyznaczonej dwoma różnymi instrumentami

Parametr	Symbol	Typ instrumentu		
		TCR 303 Leica		GX Trimble
Liczba stanowisk	–	3	8	1
Promień podstawy powłoki ($R_{proj} = 37,890 \text{ m}$)	R	37,868 m	37,881 m	37,895 m
Kąt środkowy krawędzi	Δ	360°		140°
Błąd wyznaczenia promienia	M_r	0,022 m	0,009 m	0,005

4. Ocena stopnia deformacji inwentaryzowanej żelbetowej powłoki chłodni

Obecnie automatyzacja procesów pomiarowych, duży zasięg i wysoka dokładność pomiarów bezzwierciadlanych umożliwiają pozyskiwanie dużej ilości wiarygodnych danych, które precyzyjnie opisują charakter zmian w geometrii inwentaryzowanego obiektu. Zmiany te wynikają z wielkości samej powłoki i jej delikatnej, podatnej na czynniki zewnętrzne konstrukcji (zwłaszcza w okresie letnim zakres wahań temperatury powłoki ocenia się na $40\pm 50^\circ$ [4]). Zatem pomiar powłoki żelbetowej chłodni sprowadza się do określenia współrzędnych przestrzennych XYH wybranych punktów sygnalizowanych trwale na powierzchni (pomiar selektywny) lub dużej liczby punktów definiujących bezpośrednio kształt powłoki poprzez pomiar kompleksowy prowadzony w sposób automatyczny krokowy (przypadkowy).

W wypadku pomiaru powłoki w trybie automatycznym (przypadkowe kierunki pomiaru zgodne z przyjętym krokiem pomiarowym i zaznaczonym obszarem skanowania) wielkość deformacji żelbetowego płaszcza w punkcie (w przyjętym układzie lokalnym X^{LOK}, Y^{LOK}) określa zgodnie z rysunkiem 3 zależność

$$m_{def} = r_{pom} - r_{teor} = \sqrt{((X_p - X_s)^2 + (Y_p - Y_s)^2)} - \left[\frac{H_p - \left(H_i - \left(\frac{H_{i+1} - H_i}{r_{i+1} - r_i} \right) \cdot r_i \right)}{\frac{H_{i+1} - H_i}{r_{i+1} - r_i}} \right] \quad (2)$$

gdzie:

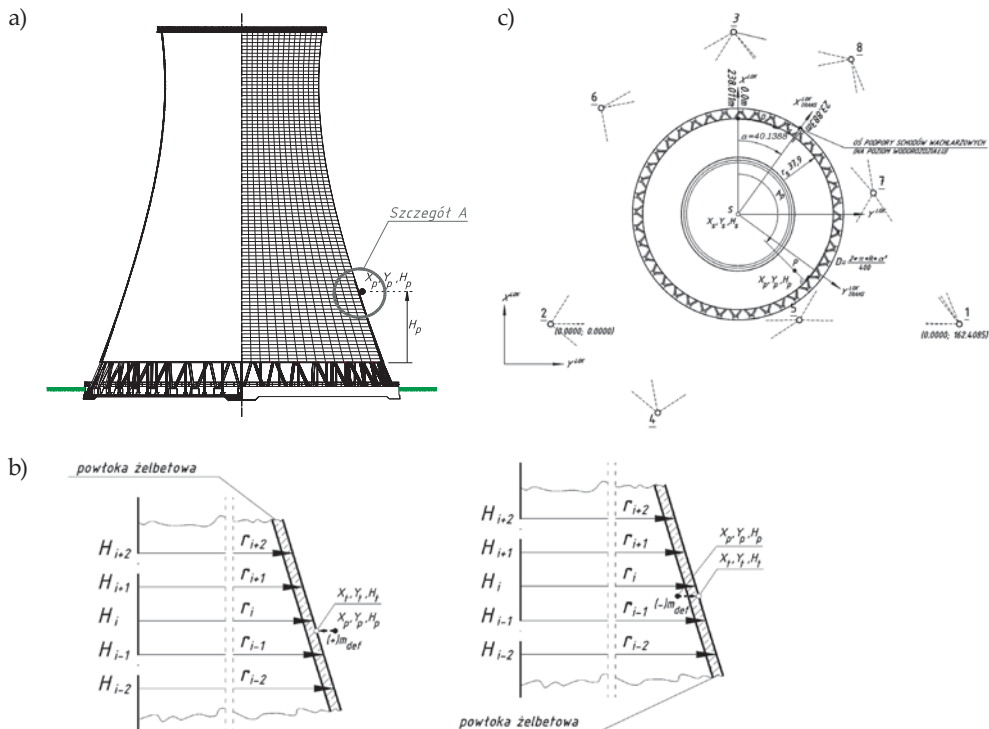
X_s, Y_s, H_s – współrzędne środka dolnej krawędzi hiperboloidalnej powłoki chłodni wyznaczone za pomocą wpasowania okręgu w zbiór punktów definiujących jej krawędź metodą najmniejszych kwadratów (MKN),

X_p, Y_p, H_p – współrzędne przestrzenne punktu odwzorowującego rzeczywistą geometrię powłoki (współrzędne uzyskane z pomiaru),

H_i, H_{i+1} – wysokości sąsiednich płaszczyzn poziomych ograniczających określony fragment profilu projektowego;

r_i, r_{i+1} – promienie zewnętrzne powłoki określone dla wysokości H_i i H_{i+1} – zgodnie z projektem.

Najlepszym sposobem wizualizacji rozkładu wielkości deformacji całej powierzchni hiperboloidalnej powłoki chłodni jest rzutowanie punktów mierzonych na pobocznice walca o podstawie zgodnej z wielkością teoretycznej podstawy powłoki chłodni (wyznaczonej z aktualnego pomiaru poprzez jego zdefiniowanie MKN), a następnie rozwinięcie pobocznic na płaszczyźnie (patrz – rys. 1).



Rys. 3. Schemat analizy stopnia deformacji powłoki na przykładzie punktu pomiarowego P (X_p, Y_p, H_p): a) widok chłodni; b) punkt pomiarowy w przekroju pionowym (szczegół); c) rzut poziomy analizowanej sytuacji

W praktyce taki algorytm w sposób czytelny pozwala ukazać zmiany geometrii chłodni w formie mapy rozkładu wielkości deformacji, gdzie powierzchnię żelbetową traktuje się jako powierzchnię topograficzną.

Rozwinięcie danych wzdłuż prostej tożsamej z dolną krawędzią powłoki (lub podstawy walca) w przyjętym lokalnym układzie współrzędnych $X^{LOK} - Y^{LOK}$ zgodnie z rysunkiem 3c umożliwiła zależność

$$D_p = \frac{2\pi \cdot R_s \cdot A_p}{400^s} \quad (3)$$

gdzie:

R_s – promień okręgu dolnej krawędzi hiperboloidalnej powłoki chłodni aproksymowany MNK na podstawie zbioru punktów ją definiujących,

A_p – azymut ramienia wodzącego w przyjętym układzie współrzędnych definiowany przez pomierzony punkt P i środek podstawy powłoki S .

Prezentowane rozwiązanie umożliwia dowolną transformację układu punktów $X^{LOK} - Y^{LOK}$ do nowego, nadrzędnego układu współrzędnych. W przypadku braku stałej osnowy pomiarowej oraz powtarzalności pomiaru w kolejnych cyklach pomiarowych elementem precyzyjnie orientującym poszczególne zbiory danych mogą być środki podpór schodów łączących powierzchnię terenu z poziomem wodorozdziału chłodni. Określenie azymutu środków podstawy powłoki – środek podpory schodów definiuje kąt obrotu układu na etapie wzajemnego „dopasowania” danych.

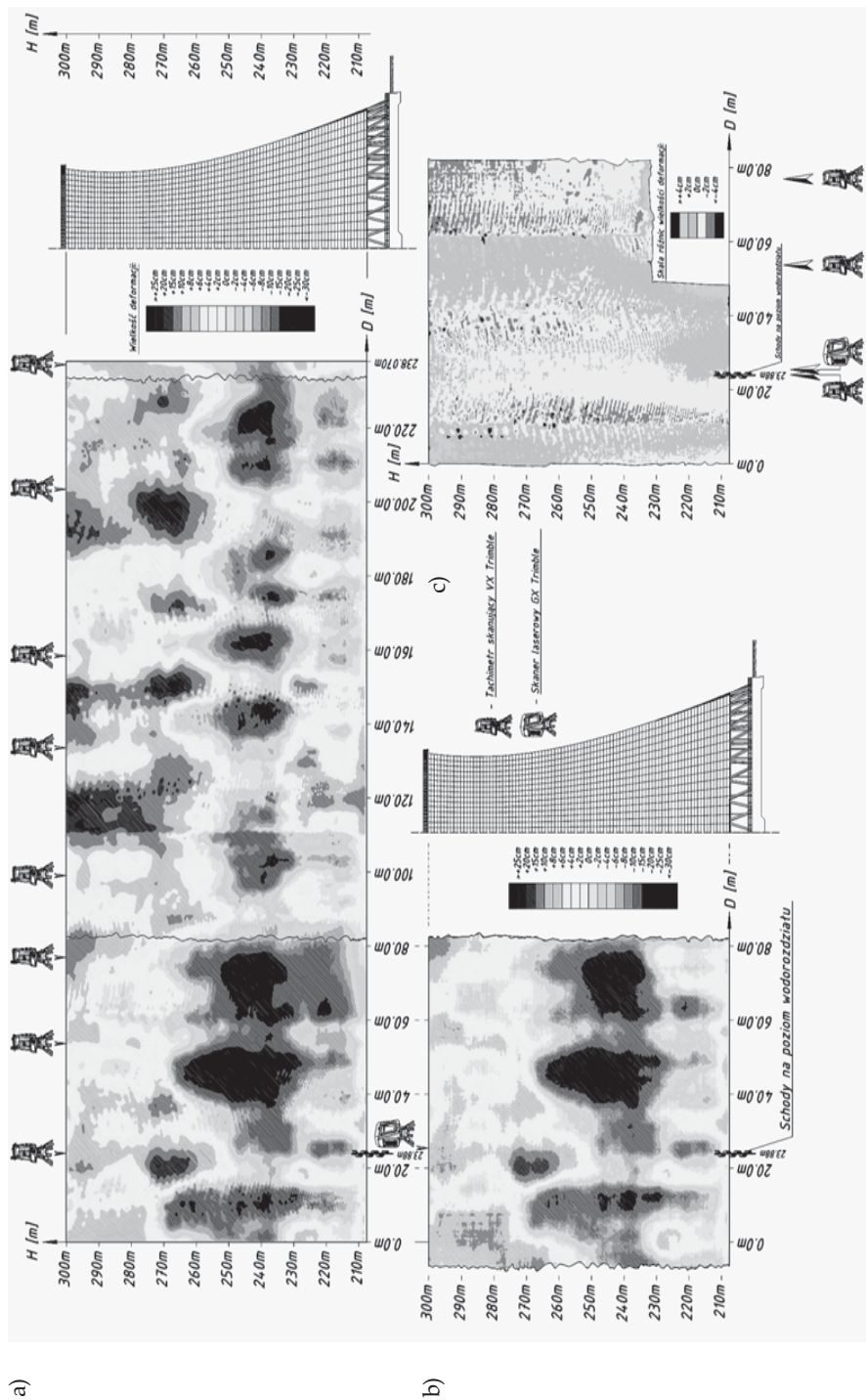
Miarodajnym wyznacznikiem rzeczywistej dokładności instrumentu w warunkach polowych oraz przydatności prezentowanego algorytmu obliczeniowego jest bezpośrednie porównanie danych pomiarowych uzyskanych różnymi przyrządami.

Pomiar powłoki chłodni hiperboloidalnej Elektrociepłowni „Kraków” SA wykonano najnowocześniejszym i najszybszym w chwili obecnej na świecie tachimetrem skanującym VX firmy Trimble, zaś wybrany fragment porównania dokładności pomierzono skanerem panoramicznym GX. Przy założeniu warunków zdefiniowanych wzorami: (1), (2) i (3), sporządzono mapy deformacji powłoki hiperboloidalnej chłodni nr 2 Elektrociepłowni „Kraków”. Rozkłady wielkości deformacji poszczególnych pomiarów przedstawiają rysunki 4a i 4b.

Zamiana przypadkowych danych punktowych na postać regularnych siatek interpolacyjnych „grid” stwarza możliwość dokonania miarodajnych porównań. Mając zdefiniowane powierzchnie topograficzne obrazujące rozkład określonego parametru m_{def} z dwóch różnych, niezależnych pomiarów, możemy dokonać analizy jego zmian w zadanym czasookresie, wykorzystując działania matematyczne na powierzchniach. Wyniki porównania ilustruje rysunek 4c. Z wypadkowego rozkładu wynika, iż przeważają obszary o różnicy nieprzekraczającej ± 2 cm, zaś pozostała część stanowią enklawy („wysepki”) o różnicach nieznacznie ją przekraczających. Mogą one wynikać z lepszego i dokładniejszego zdefiniowania geometrii powierzchni żelbetowej przez skaner, bowiem liczba danych uzyskanych przez skaner jest ponad 14-krotnie większa. Zatem różnice te wynikają ze:

- sposobu połączenia obu pomiarów – wpasowania okręgów w zbiory punktów definiujących podstawy powłoki; zgodnie z wartościami zawartymi w tabeli 1, tylko na etapie wyznaczenia parametrów dopasowania, tj. wyznaczenia promieni podstawy różnica wynosi 13 mm, co wpływa na ostateczny kształt wielkości deformacji;
- zróżnicowania ilości obserwacji obu pomiarów oraz wpływu algorytmu interpolacji na ostateczny kształt powierzchni topograficznych definiujących żelbetowy płaszcz chłodni.

Ponadto szereg błędów elementarnych pomiaru w trakcie inwentaryzacji może znacząco obniżyć dokładność uzyskanych wyników.



Rys. 4. Mapy deformacji powłoki hiperboloidealnej chłodni nr 2 Elektrociepłowni „Kraków” sporządzone na podstawie skanowania: a) tachimetrem skanującym VX (f(A)) – liczebność danych: 69992 punktów; b) skanerem panoramicznym GX (f(B)) – liczebność danych 1001618 punktów; c) mapa różnic wyznaczenia wielkości deformacji powłoki żelbetowej

Do błędów tych należą m.in.: błąd pomiaru odległości m_D , błąd orientacji skanów jednostkowych na podstawie specjalne sygnały skaningowe $m_{k(GX)}$ lub przyrządów geodezyjnych $m_{k(VXY)}$, błąd położenia punktów osnowy pomiarowej $m_{P(ost)}$ lub błąd wyznaczenia pozycji sygnałów referencyjnych skanera względem punktów osnowy pomiarowej m_{syg} wpływających w rzeczywistości na wielkość ewentualnego skrócenia przestrzennego skanu i błąd dopasowania względem dwóch lub więcej skanów jednostkowych.

Jednym z warunków uzyskania większej dokładności porównania jest określenie pozycji głowicy skanującej względem punktów osnowy pomiarowej. W prezentowanym przykładzie dane uzyskane w wyniku skanowania skanerem GX wpasowano w lokalny układ współrzędnych na podstawie wyznaczonych parametrów kołowości podstawy.

5. Określenie wpływu zmiany wysokości powłoki na wielkość składowej błędu m_{def} deformacji powłoki w punkcie

Zachowanie stateczności powłoki w czasie jej eksploatacji przy założeniu maksymalnego obciążenia możliwe jest dzięki ciągłości konstrukcji oraz idealnemu dostrzymaniu założonego kształtu. Istnieje jednak szereg czynników, od których zależy kształt płaszczka oraz wielkość zmian jego geometrii w czasie.

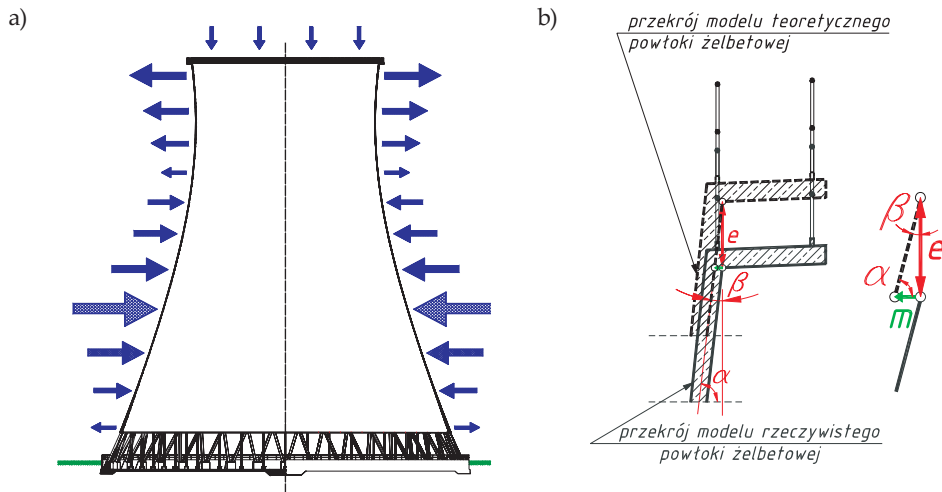
Kompleksowość danych skaningowych umożliwia rejestrację tych zmian na całej powierzchni chłodni w krótkim okresie. Pokrycie powierzchni obiektu dużą liczbą punktów pozwala na pełną kontrolę danych skaningowych, umożliwia sporządzanie modeli trójwymiarowych na podstawie analizy modeli punktowych (z pomiaru), a także rejestrację i dokumentację odstępstw realizacyjnych inwestycji od warunków technicznych zawartych w projekcie.

Skanowanie laserowe pozwoliło stwierdzić, że poza deformacjami żelbetowej powłoki w kierunkach poziomych (do wewnątrz lub na zewnątrz płaszczka) konstrukcja ulega także odkształceniu w kierunku pionowym (spłaszczeniu) – rys. 5a. Uwzględniając wartość zmiany nachylenia dolnej krawędzi galeryjki skracającej długość tworzącej powłoki, skanowanie umożliwiło wyznaczenie wysokościowego skrócenia budowli względem parametrów projektowych. Średnia wartość obniżenia korony chłodni wyniosła $e = 71$ mm (rys. 5b).

Wartość zniekształcenia m_e wyznaczonej wielkości liniowej deformacji m_{def} wynikająca z nieuwzględnienia zmiany (w formie poprawki proporcjonalnej do wysokości) wysokości (obniżenia) modelu rzeczywistego chłodni e (z pomiaru) względem modelu teoretycznego (z projektu) określa prosta zależność

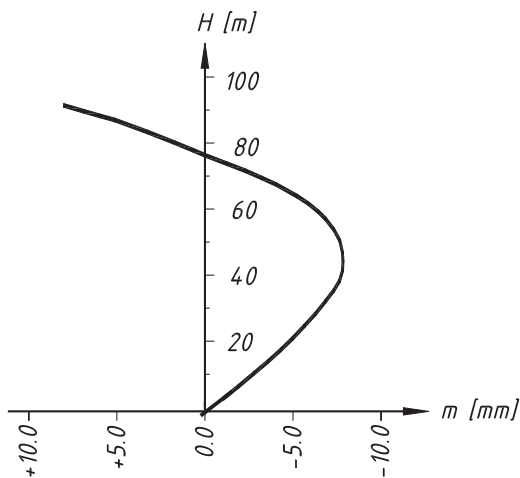
$$m_e = \frac{e}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (4)$$

gdzie α – kąt nachylenia fragmentu tworzącej powłoki na rozpatrywanej wysokości.



Rys. 5. Deformacje żelbetowej powłoki chłodni: a) schemat kierunków deformacji; b) analiza wpływu pionowego skrócenia powłoki na wielkość liniowej deformacji w kierunku poziomym m_{def} . Objasnienia oznaczeń: β – kąt odchylenia krawędzi powłoki od pionu, e – liniowe przesunięcie określonego punktu leżącego na poboczniczy powłoki

Wykres zniekształceń m_e przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Wykres zniekształceń m_e wyznaczonej wielkości deformacji m_{def} wynikających z nieuwzględnienia zmiany wysokości żelbetowej powłoki chłodni (np. dla $a = 93,2^s$ i $e = 71 \text{ mm} \rightarrow m_e = 7,6 \text{ mm}$)

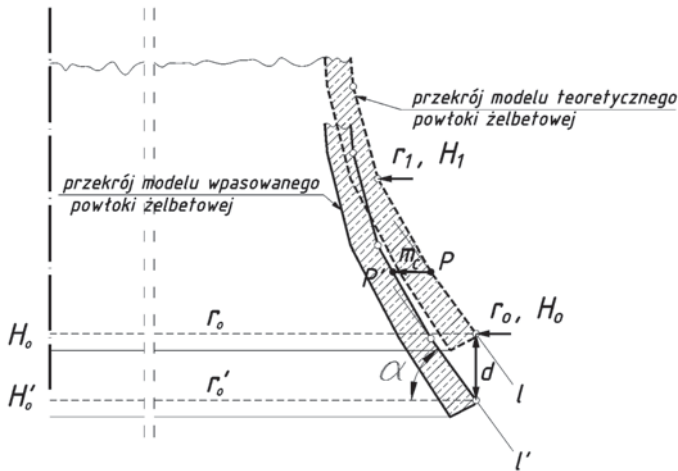
6. Wpływ błędu dopasowania wysokościowego modelu teoretycznego do modelu punktowego na wielkość zniekształcenia wyznaczenia wartości deformacji

Na końcowy obraz rozkładu deformacji powłoki chłodni (ich wielkość) ma wpływ dopasowanie wysokościowe modelu teoretycznego (projektu) do modelu punktowego uzyskanego w efekcie skanowania budowli. Z uwagi na krzywoliniowy charakter dolnej krawędzi powłoki oraz amplitudowe rozbieżności wysokości punktów ją definiujących dokładność wpasowania wysokościowego także wpływa na końcową wartość wyznaczenia wielkości deformacji powierzchni chłodni.

Wielkość zniekształcenia m_c wyznaczonej wielkości deformacji m_{def} (rys. 7), wynikająca z błędnego zdefiniowania wysokości dolnej krawędzi powłoki H_o , a tym samym niewłaściwego wpasowania modelu teoretycznego (projektu) o wielkość pionowego przesunięcia d określa zależność

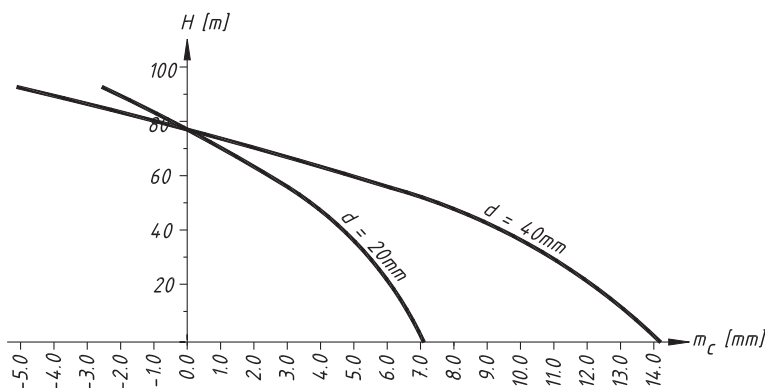
$$m_c = \frac{d}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (5)$$

gdzie α – kąt nachylenia fragmentu tworzącej powłoki chłodni na wysokości rozpatrywanego punktu pomiarowego P (proste l i l' są liniami równoległymi definiowanymi na podstawie par promieni zewnętrznych płaszcza r_i oraz ich wysokości H_i).



Rys. 7. Schemat wpływu błędnego dopasowania modeli: rzeczywistego i teoretycznego na wielkość liniowej deformacji m_{def} żelbetowej powłoki chłodni. Objasnienia oznaczeń: r_1 – teoretyczny promień przekroju kołowego powłoki na poziomie H_1 , r_o – teoretyczny promień podstawy powłoki na poziomie H_o , H'_o – rzeczywista wysokość podstawy powłoki wyznaczona z pomiaru

Jak wynika z analizy przeprowadzonej w [2], zastąpienie tworzącej hiperbolicznej linią łamaną odwzorowującą rzeczywisty kształt linii przekroju pionowego powłoki pozwala uprościć zagadnienie wyznaczenia parametru m_c . Niedokładne wyznaczenie wysokości dolnej krawędzi powłoki na podstawie uzyskanych danych lub przyjęcie określonej metodyki jej wyznaczenia powoduje zniekształcenie nieliniowe wyznaczanych wielkości deformacji płaszcza żelbetowego chłodni. W sytuacji prezentowanej na rysunku 7 maksymalna wartość zniekształcenia wyznaczanej wielkości deformacji powłoki w punkcie osiąga wartość dla strefy dolnej krawędzi powłoki ($c = 7,2$ mm przy $d = 20$ mm, gdzie d przyjęto jako $0,5 \cdot [H_{\max} - H_{\min}]$, zaś H_{\max} i H_{\min} są wysokościami skrajnymi spośród wszystkich danych określających krawędź podstawy powłoki). Wykresy błędów wyznaczenia deformacji powłoki m_c w punkcie wynikających z nieprawidłowego wyznaczenia wysokości H_0 podstawy dolnej krawędzi chłodni lub przyjęcia niewłaściwej metodyki określenia przybliżonej jej wysokości przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Wykresy błędów wyznaczenia deformacji powłoki m_c w punkcie wynikających z nieprawidłowego wyznaczenia wysokości H_0 podstawy dolnej krawędzi chłodni lub przyjęcia niewłaściwej metodyki określenia przybliżonej jej wysokości

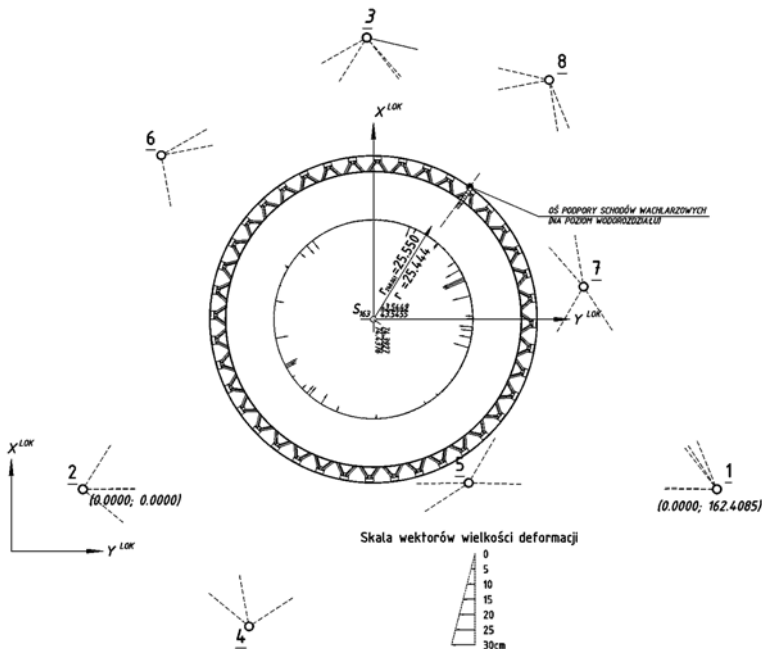
7. Inny sposób analizy stopnia deformacji żelbetowej powłoki

Innym sposobem analizy dużych zbiorów danych punktowych oraz prezentacji zjawiska deformacji chłodni może być wykorzystanie matematycznych narzędzi statystycznych, a ściślej metody najmniejszych kwadratów (MNK) oraz generowanie okręgów na zadanych poziomach (aproksymacja) na podstawie wyodrębnianych z chmury punktów. Wyselekcjonowanie ze zbioru danych punktów leżących na konkretnych, zadanych przekrojach poziomych pozwala na matematyczną ich

analizę. Polega ona na wpasowaniu w wybrany zbiór punktów definiujących kształt powłoki w przekroju – okręgu, przy zachowaniu warunku, że

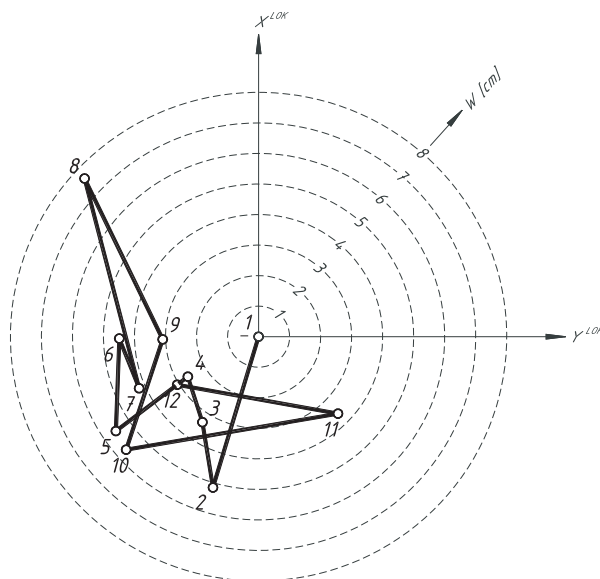
$$[pvv] = \min.$$

Aproksymacja okręgu w chmurę punktów przekroju MNK definiuje trzy jego parametry, tj. współrzędne środka X_s , Y_s oraz wartość promienia r_i . Globalna deformacja powłoki na określonym poziomie chłodni, np. „pęcznienie lub skurcz powłoki” wywołane wspomnianymi czynnikami może znacząco wpłynąć na zmianę wielkość promienia r_i względem wartości modelowej (projektowej). MNK niweluje wpływ lokalnych deformacji płaszcza na ostateczną wartość okręgu, a ponadto daje odpowiedź na temat rozkładu powstałych deformacji na całym obwodzie danego poziomu. Na podstawie wyselekcjonowanych z chmury punktów danych wyznaczono parametry okręgów wybranych przekrojów poziomych. Wielkości zniekształceń promieni f_r na wybranych poziomach rozpatrywanej chłodni zawierają się w przedziale $f_r = -115,0 \div +83,4$ mm. Punktowe dane określonego przekroju umożliwiają sporządzenie wektorowych wykresów zniekształceń powłoki w odniesieniu do wartości modelowych (projektowych). Przykład takiego opracowania dla wybranego przekroju ($H = 248,061$ m) prezentuje rysunek 9.



Rys. 9. Przykład prezentacji zjawiska deformacji powłoki metodą aproksymacji okręgu w punkty leżące w wybranym przekroju poziomym $H = 248,061$ m

Ponadto powtórzenie analizy punktów dla innych wybranych wysokości umożliwia wyznaczenie charakterystyki wychylenia osi chłodni na całej jej wysokości, co zostało zilustrowane na rysunku 10.



Rys. 10. Wykres wychylenia osi chłodni opracowany na podstawie analizy okręgów wyznaczonych drogą aproksymacji. Objaśnienia: 1–12 – środki okręgów wybranych w badaniu punktów na określonych poziomach badanych; w – wielkość nachylenia osi powłoki w cm; X^{LOK}, Y^{LOK} – badany układ współrzędnych

Metoda aproksymacji okręgów w punkty pomiarowe nie jest jednak pozbawiona wad. Nierównomierne deformowanie powłoki (rys. 4) może sztucznie przesunąć środek aproksymowanego okręgu oraz zniekształcić wartość promienia. Zatem specyfika rozkładu punktów po obwodzie nie daje pewnych gwarancji, iż otrzymane wyniki aproksymacji odzwierciedlą stan faktyczny, szczególnie w sytuacji, gdy w danych występuje dużo obserwacji odstających od określonej krzywej trendu. MNK dostosowuje się do punktów najbardziej oddalonych od średniej, które mogą wprowadzić największy błąd. W praktyce jeżeli w zbiorze punktów znajdzie się choćby jedna obserwacja zakłócająca przebieg rozkładu punktów po obwodzie powłoki, wówczas ona przyciągnie do siebie linię lub krzywą trendu. Niestety takie zjawisko w geodezyjnych danych pomiarowych jest dość często spotykane. Dlatego przed przystąpieniem do definiowania parametrów okręgu należy przeanalizować dane pod tym kątem. Konieczne jest więc sprawdzenie danych pod kątem przyna-

leżności odwzorowanych punktów w zbiorze do powłoki, a nie innych elementów, np. drabinek komunikacyjnych, galeryjek oraz usunięcie tych, co do których nie ma pewności, że właściwie opisują przekrój powłoki. W konsekwencji taki zabieg minimalizuje ryzyko zniekształcenia wyniku końcowego wpasowania.

8. Podsumowanie

Wysoka cena skanerów laserowych, pomimo ogromnej różnorodności modeli, stanowi barierę w popularyzacji tej nowoczesnej techniki na krajowym rynku usług geodezyjnych. Alternatywną metodą instrumentalną mogą stać się pomiary z wykorzystaniem tachimetrów skanujących, których możliwości pomiarowe znacznie zbliżyły się do możliwości wciąż drogich skanerów. Wyróżnikiem skanowania jest dostarczanie ogromnej liczby kompleksowych danych w formie modeli punktowych. Oznacza to, że przyjęcie właściwego kroku skanowania pozwala uzyskać bezpośrednio dane punktowe inwentaryzowanej bryły, które stanowią doskonałe źródło informacji o geometrii badanego obiektu w czasie budowy i późniejszej eksploatacji oraz jego zmianie. Inwentaryzacja stopnia deformacji powłoki chłodni na podstawie wybranych punktów (sygnalizowanych) nie zawsze odzwierciedla rzeczywisty charakter powstałych w trakcie eksploatacji zniekształceń. Zwłaszcza lokalne deformacje powłoki zdiagnozowane na podstawie pojedynczych punktów mogą znacząco zafałszować ostateczny obraz zmian na etapie analiz wyników względem prawdziwego modelu obiektu. Skaniny laserowe, poprzez zwielokrotnienie liczby obserwacji, minimalizuje ewentualne błędy w interpretacji zjawiska deformacji, a także gwarantuje kontrolę danych, dostarczając jednocześnie pełny obraz zmian i odstępstw od wartości modelowych. Zaletą skaningu danych jest ogromna ich liczebność oraz elastyczność w procesie analizy zjawiska deformacji inwentaryzowanej budowli. Wielopunktowe zbiory stwarzają możliwość prowadzenia analiz pod różnym kątem ich przydatności. Przytoczony w artykule przykład dowodzi, że przyjęcie określonego algorytmu obliczeniowo-graficznego pozwala przedstawiać obraz deformacji na różne sposoby. Porównanie dwóch prezentowanych nowoczesnych instrumentów w warunkach polowych na konkretnym przykładzie pozwala uzyskać bardziej wiarygodne wyniki w odróżnieniu od tradycyjnych testów wykonywanych na bazach komparacyjnych prowadzonych w warunkach laboratoryjnych lub terenowych, gdzie wyznacza się charakterystykę tylko wybranych parametrów, i to zazwyczaj w optymalnych warunkach atmosferycznych [2]. Inwentaryzacja określonego modelu w terenie charakteryzującego się znaczącą kubaturą, zmienną geometrią i barwą pozwala zdefiniować maksymalne błędy wyznaczanych parametrów deformacji mierzonych powierzchni, uwzględniając przy tym szereg różnych czynników mogących w sposób znaczący obniżyć

dokładność pomiaru. Do tych czynników zaliczyć możemy: błędy nawiązania sytuacyjno-wysokościowego skanów do punktów osnowy powodujące „rozmycie” modelu punktowego na etapie ich sklejania, wpływ niedokładności wyznaczenia położenia punktów osnowy powodujący przesunięcia skanów względem inwentaryzowanej bryły itp. Porównanie efektów skanowania przy przyjęciu opisywanego algorytmu pomiaru i opracowania pozwala stwierdzić, że różnice w wyznaczanych wielkościach deformacji żelbetowej powłoki w większości nie przekraczają ± 2 cm. Pozwala także wnioskować na temat optymalizacji rozmieszczenia stanowisk pomiarowych względem inwentaryzowanej bryły. Przeprowadzona analiza wykazała, że zbyt bliskie rozmieszczenie stanowisk pomiarowych (np. stanowisko nr 5 tachimetru VX – rys. 9) przy niekorzystnym skręceniu mierzonych płaszczyzn powierzchni oraz błędy orientacji skanów, mogą nieznacznie obniżyć dokładność wyznaczenia położenia punktów powłoki (strefa $60 \div 80$ m – rys. 4 c).

Ponadto analizę deformacji na podstawie prowadzonych cyklicznych pomiarów w ramach monitoringu budowli może upraszczać zastosowanie algorytmów interpolacyjnych. Zatem traktując powierzchnię żelbetowej powłoki jako powierzchnię topograficzną, obserwowaną i definiowaną na podstawie pomiarów okresowych oraz wykonując działania matematyczne na tych powierzchniach (odejmowanie), możemy definiować wielkość różnic w geometrii badanej powłoki. Taka metoda analizy danych punktowych (o przypadkowym rozkładzie punktów na mierzonej powierzchni) stanowi skuteczne narzędzie wyznaczania zmian geometrii obiektu w czasie.

Literatura

- [1] Boehler W., Heinz G., Marbs A.: *The potential of non – contact close range laser scanners for cultural heritage recording*. XVIII CIPA Symposium, Potsdam (Germany) 2001.
- [2] Gawałkiewicz R.: *Nowoczesne technologie geodezyjne w inwentaryzacji wielkokubaturowych obiektów podziemnych*. AGH, Kraków 2005 (rozprawa doktorska niepublikowana).
- [3] Gocał J. i in.: *Geodezja inżynierska. T. II*. Wyd. II zmienione, Polskie Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa – Wrocław 1994.
- [4] Ledwoń J., Golczyk M.: *Chłodnie kominowe i wentylatorowe*. Arkady, Warszawa 1967.

Materiały uzupełniające

- [5] *Dokumentacja projektowa chłodni hiperboloidalnej o obciążeniu hydraulicznym $35000 \text{ m}^3/\text{h}$* . Przedsiębiorstwo Budowy Chłodni w Gliwicach, Gliwice 1979.

-
- [6] Polska Norma PN-91/B-02020: *Ochrona cieplna budynków. Wymagania i obliczenia.*
- [7] Rozporządzenie Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa z dnia 21 lutego 1995 r. w sprawie rodzaju i zakresu opracowań geodezyjno-kartograficznych oraz czynności geodezyjnych obowiązujących w budownictwie. Dz. U. Nr 95, poz. 133.