

Prognoza przestrzennej deformacji kompleksu hal przemysłowych z wykorzystaniem geodezyjnych obserwacji przemieszczeń

Dr hab. inż. Zygmunt Kurałowicz, prof. nadzw. PG, mgr inż. Grzegorz Brzóska
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

W większości obiekty budowlane ulegają przemieszczeniom i dlatego już na etapie projektowania należy określić wartości dopuszczalne i graniczne tych przemieszczeń, biorąc pod uwagę rodzaj budowli, np. osiadania lub/i odchylenia od pionu. W przypadku ważniejszych budowli ich przemieszczenia są kontrolowane w czasie wznoszenia oraz użytkowania. Jeżeli przemieszczenia są stosunkowo niewielkie, to nie stanowią zagrożenia stateczności konstrukcji lub bezpieczeństwa użytkowania. Przykładowo, nieduże osiadania podłoża gruntowego o rozkładzie równomiernym pod całą budowlą nie wywołują szkodliwych zmian w konstrukcji. Natomiast znaczne osiadania nierównomierne w obrysie budowli lub pod elementami konstrukcji, na przykład słupami tej samej hali, są groźne dla jej stateczności – budowla ulega znacznej deformacji. Ponieważ, opisane sytuacje mogą też stanowić zagrożenie dla innych obiektów budowlanych posadowionych w bliskim sąsiedztwie, należy prowadzić obserwacje geodezyjne. Pomiaru geodezyjne powinny dotyczyć osiadania podłoża, fundamentów i przemieszczenia wybranych elementów konstrukcji, na przykład przemieszczenia pionowe i odchylenia od pionu w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach słupów hali. Mając wyniki obserwacji geodezyjnych, można wyznaczyć dane niezbędne do przeanalizowania stanu obiektu budowlanego i podjąć działania zapobiegające awarii lub katastrofie budowlanej. Obecnie stosowane techniki geodezyjne i technologie pomiarowe są narzędziami, które pozwalają geodecie zastosować odpowiednią metodę i instrumenty do pomiaru o wymaganych dokładnościach dla danego obiektu bu-

dowlanego. A zatem, wyniki obserwacji geodezyjnych należą do podstawowych danych wykorzystywanych w programach komputerowych do oceny stanu obiektów budowlanych i prognozy dalszych zmian.

Artykuł jest kontynuacją tematyki dotyczącej wykorzystania wyników pomiarów geodezyjnych w ocenie stanu konstrukcji stalowych. Wyniki obserwacji, dokładności i wiarygodności geodezyjnych precyzyjnych pomiarów osiadania słupów hal wykonywanych przez Katedrę Geodezji WILiŚ Politechniki Gdańskiej przedstawiono w pracach [2, 3]. Niniejszy artykuł zawiera prognozę przemieszczeń słupów stalowych oraz obszary deformacji konstrukcji kompleksu hal stalowych i jest rozwinięciem problemu opisanego w pracy [1]. Zakładając różne symulacje przemieszczeń wybranych słupów na numerycznym modelu kompleksu hal, korzystając z programu Matlab, określono strefy zwiększonych przemieszczeń i deformacji konstrukcji hal. Kluczowym elementem analizy i prognozy było wyznaczenie najbardziej zagrożonych obszarów kompleksu hal pod względem deformacji.

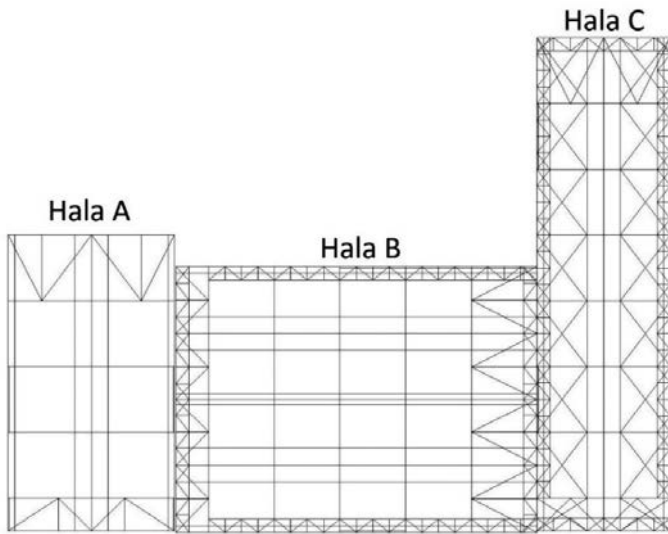
KONSTRUKCJA HAL I OPIS POMIARÓW GEODEZYJNYCH

Układ przestrzenny analizowanego obiektu budowlanego stanowi kompleks trzech hal o stalowej konstrukcji ramowej. Hale mają wspólne przepierzenia ścian, a każda z nich ma od-

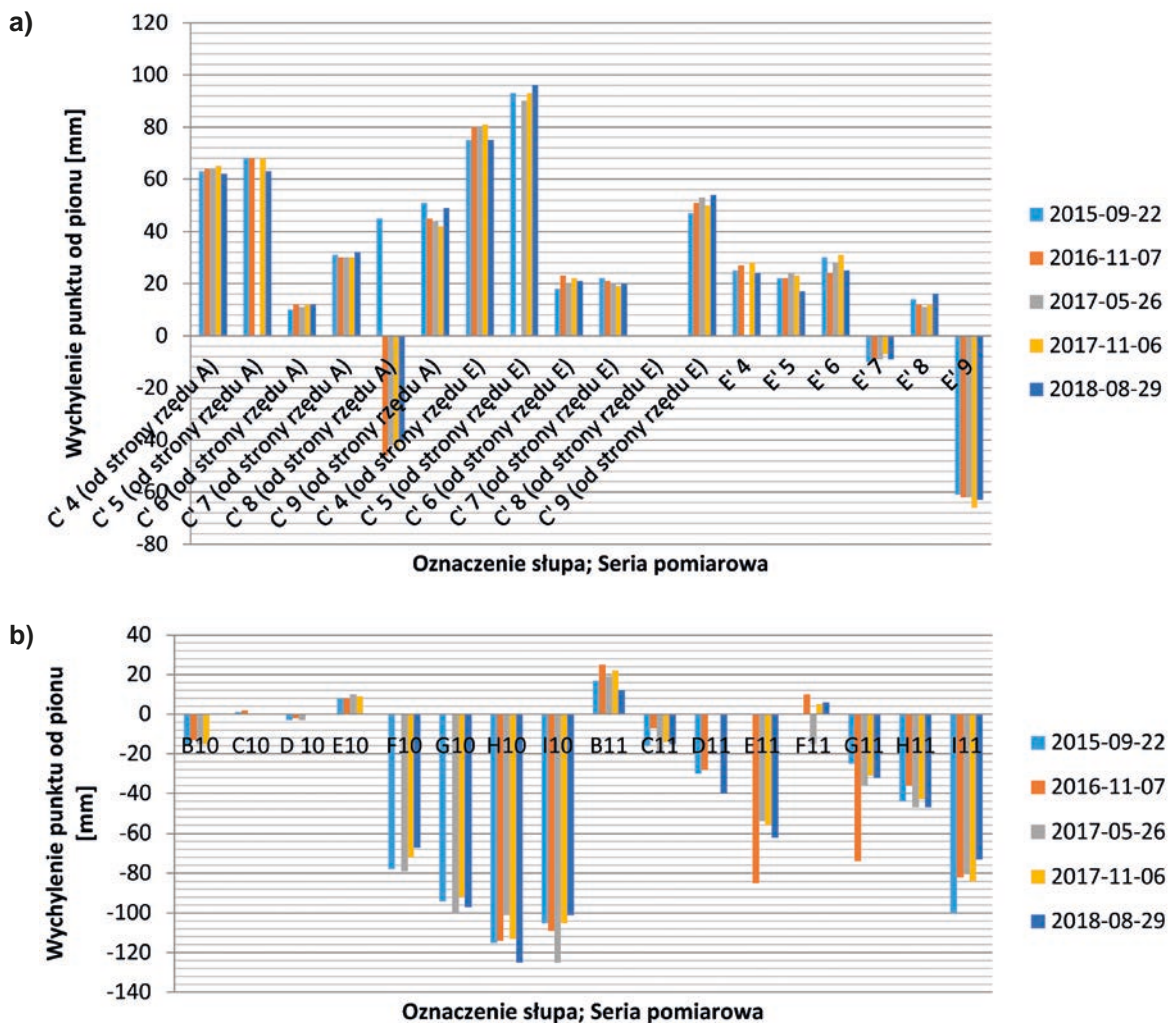
dzielne wsporniki słupowe (rys. 1). W ścianach zewnętrznych są przeszklenia – szyby w profilach stalowych. Fundamenty hal stanowią monolityczne stopy żelbetowe o rozstawie osiowym wzdłuż każdej ze ścian 12,0 m lub 6,0 m (słupy skrajne)

na palach Franki. Na stopach zewnętrznych hal podparcie dla żelbetowych lub murowanych ścian stanowią belki podwalinowe. Słupy są skonstruowane ze stalowych dwuteowych profili blachownicowych. Każda z hal jest wyposażona w suwnice pomostowe. Na słupach hal oparte są kratowe dźwigary stalowe, dwuspadowe o kształcie dwutrapezowym, na których oparte są płatwie skonstruowane z zespolonych profili ceowych.

Hale są eksploatowane ponad 40 lat, jednak po stosunkowo krótkim okresie użytkowania, w przeszklonych ścianach oraz świetlikach wystąpiły spękania szyb i deformacje żelbetowych płyt ściennych. Przeprowadzone wówczas geodezyjne pomiary przemieszczeń stalowych słupów hal potwierdziły znaczne nierównomierne ich osiadanie i wychylenie od pionu. Na podstawie analizy i oceny stanu konstrukcji Użytkownik zlecił prowadzenie okresowych obserwacji geodezyjnych i kontynuował współpracę z WILiŚ Politechniki Gdańskiej w zakresie analizy wytrzymałości konstrukcji [4, 5]. Mierzone od 2006 roku osiadania wynoszą od kilku do ponad 40 mm. Przykładowe wyniki kilkuletnich pomiarów wychylenia słupów od pionu pokazano na rys. 2a i 2b. Wychylenia słupów w mierzonej płaszczyźnie (wzdłuż rzędów słupów) są zmienne (w przeciwnych kierunkach) i wynoszą od kilku do ponad 120 mm, na przykład słupy C'5, I11, G10, H10 i I10.



Rys. 1. Schemat konstrukcji kompleksu hal przemysłowych – rzut



Rys. 2. Wychylenie głowicy słupów C'4 – C'9 od pionu w hali B (a) oraz wykresy wychylenia głowicy słupów B10 – I10 oraz B11 – I11 od pionu w hali C (b)

PROGNOZA PRZEMIESZCZEŃ SŁUPÓW I DEFORMACJI KONSTRUKCJI HAL

W celu opracowania prognozy przemieszczeń słupów i deformacji konstrukcji kompleksu hal stalowych jako problem diagnostyczny zdefiniowano przemieszczenie i deformację konstrukcji hal (na podstawie wieloletnich obserwacji geodezyjnych osiadania i wychylenia od pionu stalowych słupów). Jako cel założono określenie zmiany osiadania słupów w czasie oraz wstępne opracowanie prognozy na kolejne lata (w dwóch okresach) i określenie zależności między nimi. Następnie wybrano metodę prognozowania i model prognostyczny. Przyjęto, że w warunkach posadowienia hal i obciążenia osiadania niektórych słupów będą narastać, a w konsekwencji nadal będzie zachodzić proces deformacji konstrukcji kompleksu hal. Do zobrazowania konstrukcji hal w postaci cyfrowej użyto programu Matlab, w którym opracowano skrypt generujący wykresy osiadania (rys. 3a ÷ d). Na podstawie znanych osiadań słupów w okresie pierwszych 9 lat obserwacji geodezyjnych (wydzielonych z całego dotychczasowego okresu 13 lat pomiarów) zaprognozowano ich osiadania na kolejne 4 lata. Rzeczywiste wartości z pomiarów geodezyjnych w okresie wymienionych 4 lat porównano z wartościami prognozowanymi dla tego okresu obserwacji, co również przedstawiono graficznie na wykresach. Dodatkowo, z wykorzystaniem skryptu opracowano w odcieniach szarości mapy deformacji konstrukcji hal (rys. 4a ÷ d).

Program iteracyjnie dobierał wzór funkcji najlepiej opisującej osiadania, co pozwalało na odczytanie i przeanalizowanie macierzy błędów dla poszczególnych iteracji. Następnie na wykres ilustrujący krzywą prognozy naniesiono wyniki pomierzonych osiadań w celu wykonania oceny dokładności prognozy na podstawie błędów *ex post*. Skrypt programu Matlab generował macierze błędów bezwzględnych prognozy, korzystając z wzoru (1). Należy zwrócić uwagę, że dla słupa C'6 konieczna była osobna prognoza ze względu na jego nietypowe przemieszczenia (rys. 3a). W dniu 13 marca 2009 roku zaobserwowano wyraźny wzrost osiadań, po czym przemieszczenia narastały znacznie wolniej. Dlatego prognozując osiadanie słupa C'6, wyłączono 4 pierwsze obserwacje z okresu od 3.08.2006 do 29.08.2008 roku.

$$\xi_{t+j}^p = y_{t+j} - y_{t+j}^p \quad (t = 1, \dots, T-j; j = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

gdzie:

ξ_{t+j}^p – błąd prognozy obserwacji j w przedziale od 1 do T ,

y_{t+j} – wartość zmierzona,

y_{t+j}^p – wartość prognozowana.

Średni błąd bezwzględny dla hali B wyniósł 0,2 mm, natomiast dla hali C – 0,7 mm. W przypadku obu hal średni błąd bezwzględny wynosi 0,4 mm obliczony wzorem (2). W celu przybliżenia skali błędu prognozy obliczono procentowy, względny błąd prognozy *ex post* dla dwóch hal wynoszący 5,09% (3). Obliczając błąd procentowy, nie uwzględniano słupów wykazujących osiadania mniejsze niż 3 mm. Niewielkie odchyłki prognozowanych wartości od rzeczywistych pomierzonych skutkowały bardzo dużym błędem procentowym, co utrudniało analizę wyników.

$$\bar{\xi}_j^p = \frac{1}{T-j} \sum_{t=1}^{T-j} \xi_{t+j}^p = \bar{y} - \bar{y}_j^p \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

gdzie:

$\bar{y} = \frac{1}{T-j} \sum_{t=1}^{T-j} y_{t+j}$ – średnia arytmetyczna zmiennej prognozowanej,

$\bar{y}_j^p = \frac{1}{T-j} \sum_{t=1}^{T-j} y_{t+j}^p$ – średnia prognoz z wyprzedzeniem j okresów.

$$PE_{t+j}^p = \frac{\xi_{t+j}^p}{y_{t+j}^p} \cdot 100\% \quad (t = 1, \dots, T-j; j = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

gdzie:

ξ_{t+j}^p – jest średnią arytmetyczną bezwzględnych błędów prognozy.

Średnie arytmetyczne błędów dla całego kompleksu trzech hal są ujemne, co wskazuje na tendencję w opracowanej prognozie o większych wartościach niż stwierdzono w późniejszych obserwacjach. Jedynie w rzędzie słupów A3 – A9 zaobserwowano nieco większe osiadania niż prognozowane.

Procentowy względny błąd prognoz wystąpił w przypadku kilku słupów – znaczące odchyłki pomierzonych osiadań w stosunku do prognozowanych wartości w przypadkach: zniszczenie punktu pomiarowego (skrypt wykonywał obliczenia na niekompletnych danych) lub wystąpiła wyraźna zmiana w dotychczasowym trendzie przemieszczeń danego słupa.

Miarę zgodności kierunków krzywej prognozowanej i rzeczywistych tendencji osiadania słupów wyrażono współczynnikiem korelacji liniowej Pearsona (4):

$$r_{y, y_j^p} = \frac{\hat{\sigma}(y, y_j^p)}{\hat{\sigma}(y)\hat{\sigma}(y_j^p)} \quad (4)$$

gdzie:

$$\hat{\sigma}(y, y_j^p) = \frac{1}{T-j-1} \sum_{t=1}^{T-j} (y_{t+j} - \bar{y})(y_{t+j}^p - \bar{y}_j^p) \quad (5)$$

– kowariancja zmiennych,

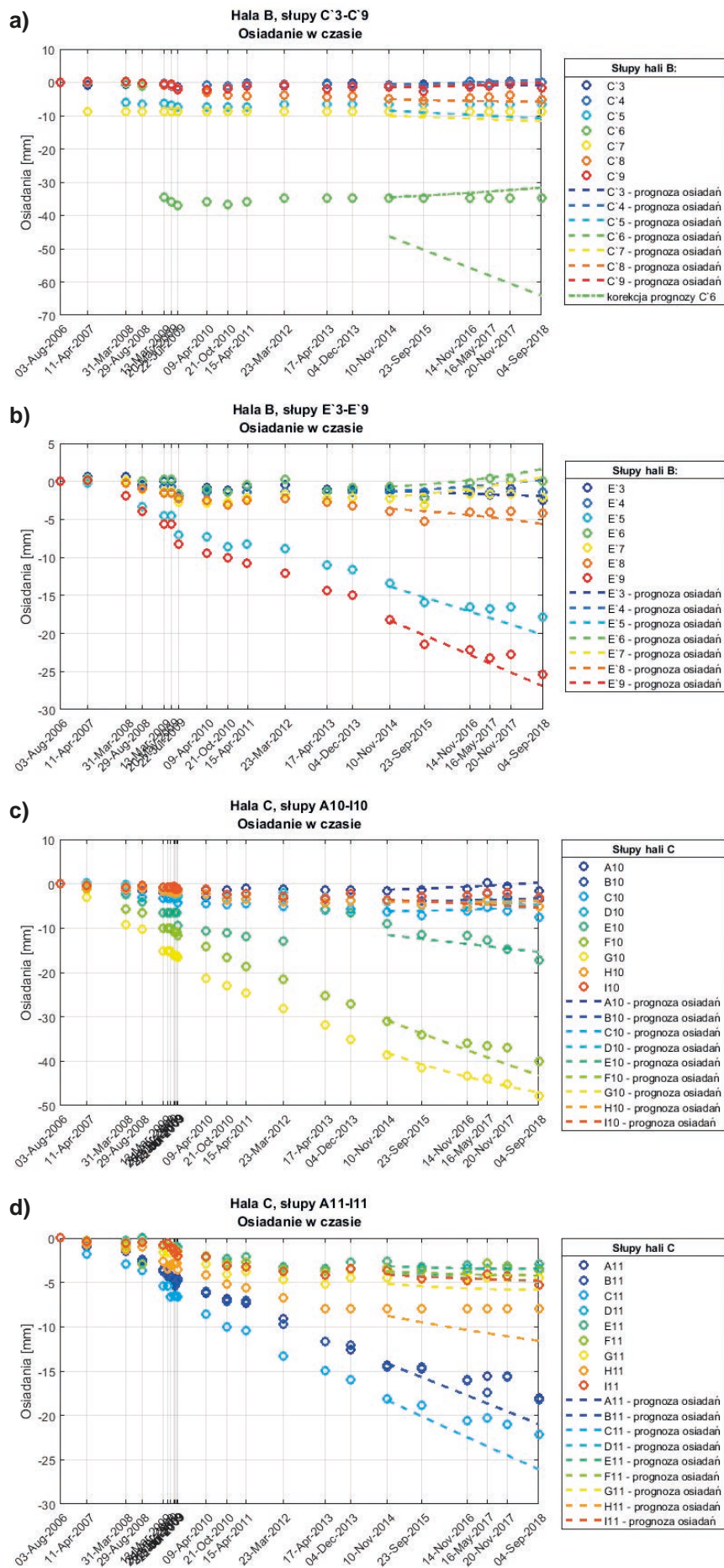
$$\hat{\sigma}^2(y) = \frac{1}{T-j-1} \sum_{t=1}^{T-j} (y_{t+j} - \bar{y})^2 \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}^2(y_j^p) = \frac{1}{T-j-1} \sum_{t=1}^{T-j} (y_{t+j}^p - \bar{y}_j^p)^2 \quad (7)$$

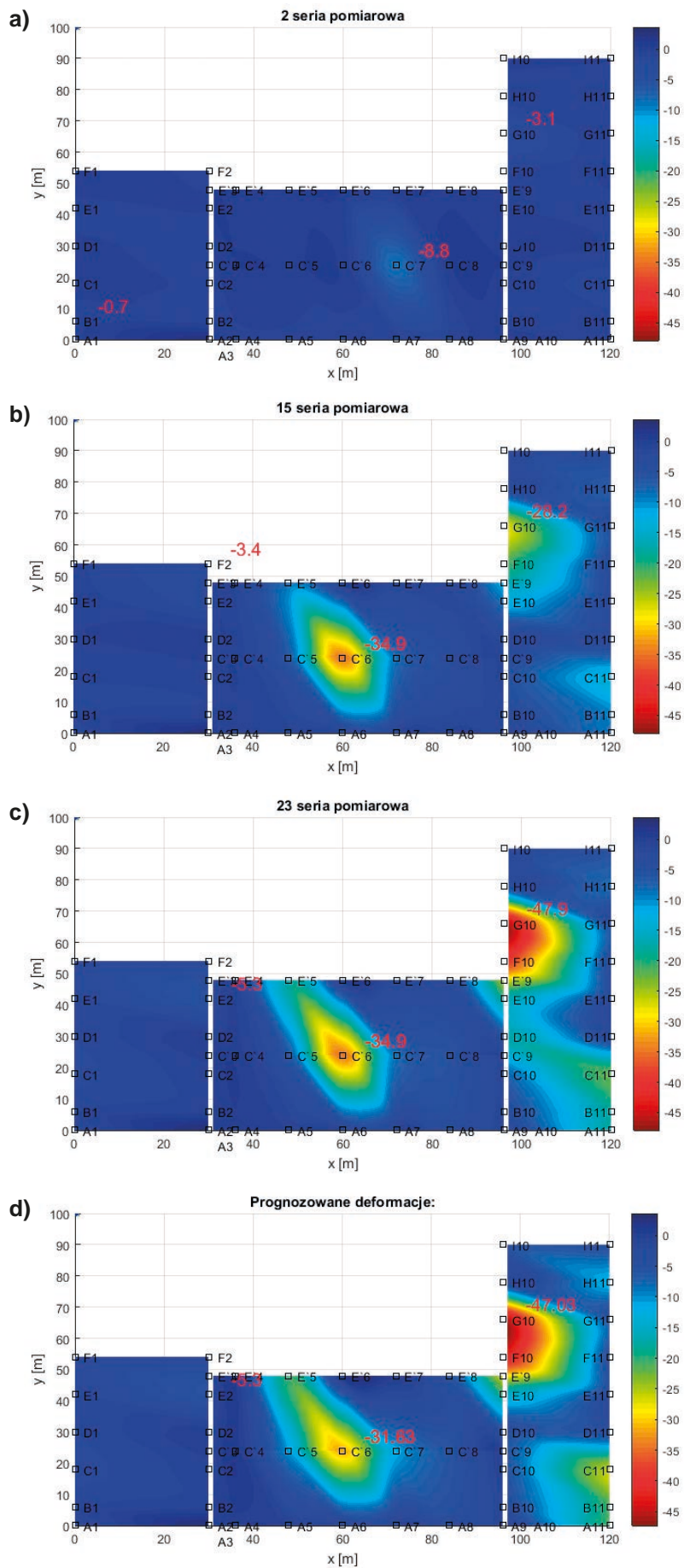
– odchylenia standardowe zmiennych.

Na podstawie wzoru (5) obliczono kowariancje zmiennych prognozowanej i pomierzonej dla wszystkich słupów kompleksu hal. Kowariancja będąca z reguły miarodajną wartością, w przypadku tak małej liczby porównywanych wartości jest w dużym stopniu nieprzewidywalna. Bardziej miarodajny obraz korelacji między wartościami prognozowanymi a pomierzonymi przedstawia współczynnik korelacji Pearsona. Jednak również tę wartość łatwo jest „zmylić” odchyłkami pomiarów. Przykładowo, gdy w jednej z czterech pomierzonych wartości (25% pomiarów) pojawiła się odchyłka od spodziewanej wartości, wartość współczynnika korelacji drastycznie spadła. Większa liczba pomiarów zdecydowanie poprawia jakość prognozy. W hali B współczynnik korelacji ma średnią wartość bezwzględną 0,7 – osiadania większości słupów są dobrze opisane przez prognozę czteroletnią. W przypadku hali C osiadania również były prognozowane prawidłowo. Dla słupów F10 i G10, charakteryzujących się największymi osiadaniami, współczynnik korelacji liniowej Pearsona wynosi od 0,95 do 0,99 [1].

Dodatkowo, korzystając ze skryptu programu Matlab, opracowano mapy deformacji hal przedstawione na rys. 4a ÷ d.



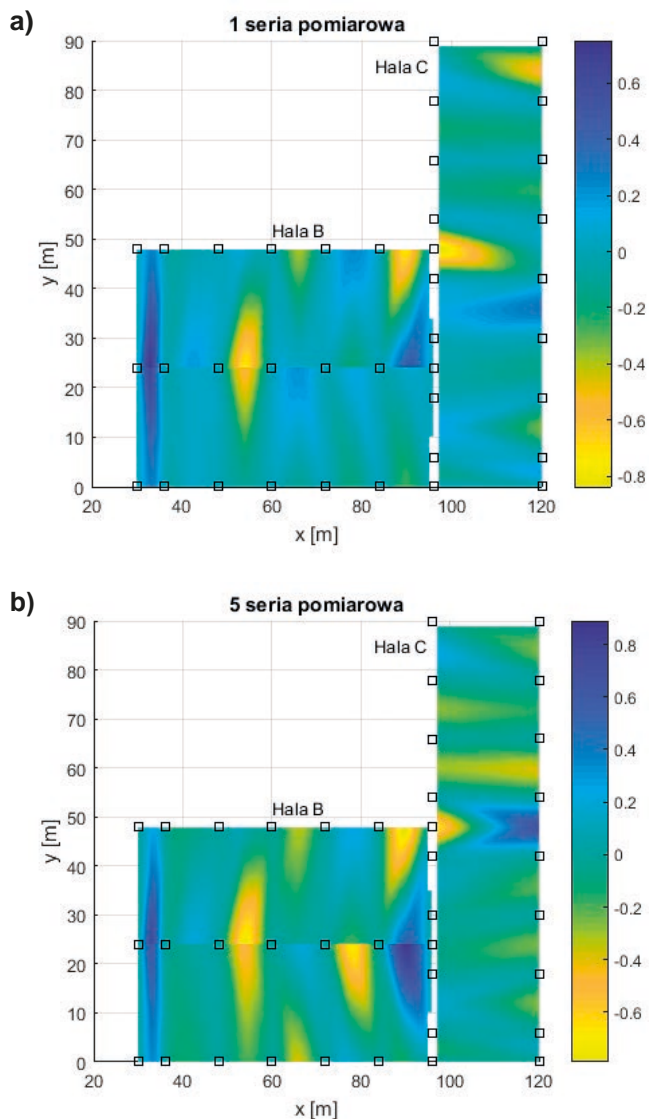
Rys. 3. Czteroletnia prognoza osiadań słupów C'3 – C'9 w hali B (a), E'3 – E'9 w hali B (b), A10 – I10 w hali C (c), A11 – I11 w hali C (d)



Rys. 4. Wymodelowane płaszczyzny – widok z góry
 a) 2. seria pomiarowa, b) 15. seria pomiarowa, c) 23. seria pomiarowa, d) prognoza deformacji w 2018 roku

W skrypcie założono słupy hal jako elementy sztywne i przedstawiono deformację przekrycia hali uproszczonego w modelu do płaszczyzny. Części płaszczyzn, w zależności od deniwelacji, oznaczono na czerwono (obszary najbardziej obniżone) oraz na niebiesko (obszary charakteryzujące się znikomymi przemieszczeniami). Wartości liczbowe na rysunku oznaczają wartości osiadań w najniższej położonych punktach płaszczyzn. W obrębie hal wyraźnie rysują się trzy strefy dużych osiadań dochodzących do 37,9 mm i 47,9 mm. Na zobrażowaniach widoczne są strefy, w których deformacje są „najsilniejsze”. Przykładem jest strefa przy słupie C'7 powstała praktycznie od początku obserwacji. Jednak już w kolejnych seriach pomiarowych pojawiły się duże obniżenia płaszczyzny wokół słupa C'5 oraz słupów E'9, F10 oraz G10. Podczas 15. serii pomiarowej uwidoczniły się również wyraźne odkształcenia płaszczyzny między słupami A11 i C11 (narastają do 23. serii pomiarowej). Na rys. 4d zobrażowano deformację hal na podstawie prognozy.

Pomiary wychyleń, przeprowadzone w halach B oraz C, zobrażowano dodatkowo. Wychylenia słupów od pionu mogą skutkować pewnymi deformacjami w całej konstrukcji hal.



Rys. 5. Wymodelowane płaszczyzny – zmiany odległości między głowicami słupów
a) 1. seria pomiarowa wychyleń, b) 5. seria pomiarowa wychyleń

W konstrukcji nośnej rozpiętej pomiędzy głowicami słupów mogą pojawić się naprężenia. Na rys. 5a i 5b przedstawiono strefy zmian tych odległości jako dodatnie (kolor granatowy) lub ujemne (kolor żółty). Dodatnie zmiany odległości mogą być przyczyną pojawienia się naprężeń rozciągających, natomiast ujemne zmiany – naprężeń ściskających. Na przedstawionych rysunkach jest wyraźnie widoczne zagęszczenie zagrożonych stref między pierwszą i ostatnią serią pomiarową. Słupy charakteryzują się znacznymi odchyleniami od pionu w obu obiektach, zwłaszcza w środkowym rzędzie słupów hali B.

WNIOSKI Z PRZEPROWADZONEJ SYMULACJI PROGNOZY

Miary oceny dokładności prognoz, takie jak: bezwzględne błędy prognozy *ex post*, względne błędy oraz średnie arytmetyczne błędów pozwoliły zweryfikować przeprowadzone analizy pod względem jakościowym. Średnia arytmetyczna błędów prognoz *ex post* była w znacznej większości ujemna. Wskazuje to na tendencję do prognozowania osiadań większych niż faktycznie ma to miejsce. Procentowe błędy względne prognozy czteroletniej ujawniły duże niedokładności predykcji w przypadku niektórych słupów. Największe błędy odnoszą się do słupów, które wykazują się wyraźnym przyrostem osiadania. Również zmienność wartości osiadania ma duży wpływ na dokładność prognozy w stosunkowo krótkim okresie zbierania danych pomiarowych. Prognoza osiadań opracowana dla okresu od 2014 do 2018 roku jest przydatna w znacznym zakresie obserwacji. Przedstawione deformacje hal wskazują na potrzebę dalszych pomiarów i konieczność monitorowania deformacji kompleksu hal. Przedstawione strefy największych deformacji powinny zwrócić szczególną uwagę eksploatatora hal przy dalszych działaniach mających na celu zapewnienie bezpieczeństwa użytkowania obiektu. Jednocześnie należy zaznaczyć, że skrypt programu Matlab generujący zobrażenia deformacji z równoczesnym wykorzystaniem obserwacji geodezyjnych okazał się bardzo przydatnym narzędziem w przeprowadzonej analizie i wskazania zagrożeń dla użytkowanych hal.

LITERATURA

1. Brzóska G.: Analiza deformacji przestrzennej kompleksu hal przemysłowych o konstrukcji stalowej na podstawie geodezyjnych pomiarów przemieszczeń (praca dyplomowa), WILiŚ PG, 2018
2. Kamiński W., Kurałowicz Z., Chmielecki M., Rudziński K.: Metoda Hendersona w ocenie dokładności geodezyjnego pomiaru osiadania słupów wielonawowej hali przemysłowej, *Miesięcznik naukowo-techniczny Inżynieria Morska i Geotechnika* 5/2016, s. 278-281.
3. Kurałowicz Z., Chmielecki M., Rudziński K.: Opracowanie wyników pomiaru przemieszczeń pionowych i odchyłeń od pionu słupów w halach „Mostostalu Gdańsku S.A.”, Gdańsk 2017 (Maszynopis PG).
4. Michowski K.: Protokół nr 2/2016 z okresowej (rocznej) kontroli stanu sprawności technicznej obiektu, Gdańsk 2016.
5. Urbańska-Galewska E., Dobiszewski K., Nowicki M., Heizig T.: Orzeczenie naukowo-techniczne nr 1/2006/MOSTOSTAL S.A. dotyczące wykonania analizy wyteżenia konstrukcji w stanie nadmiernych przemieszczeń obiektów MOSTOSTAL Gdańsk S.A. w upadłości, Gdańsk listopad 2006.