

Pomiary geodezyjne i monitoring budynków wielokondygnacyjnych – punktowców

Dr hab. inż. Zygmunt Kurałowicz, prof. uczelni
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Od dawien dawna „konstrukcje budowlane” zbudowane w wyniku „połączenia” różnych elementów i wyróżniające się wysokością oraz kształtem od innych na danym obszarze zabudowy wzbudzały zainteresowanie. Przeznaczenie tych obiektów budowlanych najczęściej było religijne, obronne lub inżynierskie. Przykładem są budowle dawnych cywilizacji, na przykład Majów i starożytne piramidy w Egipcie oraz rzymskie akwedukty. Do dzisiaj organizacja i technologia budowy niektórych budowli stanowi dla badaczy tajemnicę oraz temat wieloletnich dociekań. Natomiast współcześnie podziw wzbudzają między innymi realizowane wielokondygnacyjne budynki wysokie oraz super wysokie tak zwane punktowce jako pojedyncze lub połączone wieże, pełniące funkcję administracyjno-usługową albo hotelowo-mieszkalną. Podstawowymi problemami związanymi z budową super wysokich budynków są: ponoszony koszt inwestycji, lokalizacja, rzeczywista ocena obciążeń działających na budynek w czasie budowy i użytkowania, rozwiązania techniczne dotyczące posadowienia i konstrukcji, jakość i wytrzymałość zastosowanych materiałów oraz organizacja prac budowlanych połączona z BHP, zakres i warunki geodezyjnej obsługi wraz z pomiarami kontrolnymi oraz koszty eksploatacji i diagnostyka stanu budynku w czasie.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BUDYNKÓW WIELOKONDYGNACYJNYCH – PUNKTOWCÓW

Wysokie, z centralnie położonym pionem komunikacyjnym, budynki wielokondygnacyjne w Polsce, według opisu architektonicznego, są nazywane punktowymi, należą do grupy zwanej wieżowcami lub drapaczami chmur. Pierwsze z nich zbudowano w Chicago pod koniec XIX wieku. Mają one cechę wspólną, to znaczy charakteryzują się zdecydowanie mniejszym przekrojem poziomym w stosunku do przekroju pionowego. Najczęściej ich przekrój poziomy stopniowo zmniejsza się z wysokością, aczkolwiek nie jest to regułą. Budynek może też stanowić kilka połączonych wież. Realizacja takich budynków od zawsze była i jest wyzwaniem dla architektów, projektantów, budowniczych i geodetów. Wymaga ona od inżynierów różnych branż rozwiązywania nowych, nietypowych problemów technologicznych i technicznych w trakcie projektowania, wznoszenia oraz użytkowania.

W przypadku najstarszych drapaczy chmur głównym elementem nośnym jest stalowy szkielet, który zastąpił tradycyjną technikę budowy z cegły. Współcześnie, superwysokie budynki – wieżowce są budowane z prefabrykowanych elementów stalowych i żelbetowych (dźwigarów, słupów, płyt) „powiązanych” specjalnymi łącznikami i spawami o bardzo dużej wytrzymałości oraz w technologii monolitycznej z betonu wysokiej klasy [28]. Cechą charakterystyczną tych budynków są przeszklenia ścian zewnętrznych o różnym kształcie. W czasie montażu elementów jest wymagana dokładność rzędu 1 mm. Najwyższy budynek na świecie o wysokości 828 m „Burj Khalifa” w Dubaju w Zjednoczonych Emiratach Arabskich posadowiono na płycie żelbetowej o grubości 3,7 m na 200 palach o średnicy 1,5 m i długości 45 m każdy [4, 12]. Poziomy użytkowe wykonano na szkielecie żelbetowym. Natomiast czterdzieści najwyższych kondygnacji zbudowano na lekkim stalowym szkielecie. Ściany zewnętrzne stanowią specjalnie przygotowane szklane panele (rys. 5, 7). Należy zaznaczyć, że przed rozpoczęciem budowy, w celu ograniczenia wpływu naporu wiatru na budynek z kierunku Zatoki Perskiej, po przeprowadzeniu obszernych analiz obciążeń, zmieniono ostateczne usytuowanie budynku względem pierwotnego projektu – budynek obrócono o 120 stopni. Ze względu na nietypowe warunki i wysoką temperaturę przez cały okres budowy prowadzono pomiary geodezyjne i monitoring przemieszczeń konstrukcji [1, 31].

Typowym sposobem i najczęściej stosowaną technologią wznoszenia budynku jest rozpoczęcie prac od fundamentów oraz najniższej kondygnacji i następnie kontynuowanie budowy (ścian i stropów) do kondygnacji najwyższej. W taki sposób zbudowano prawie wszystkie budynki wysokie i wysokościowe. Jednak są punktowce wzniesione w odwrotnej kolejności, czyli po zbudowaniu fundamentu i wież w technologii żelbetowej monolitycznej, stropy oraz ściany wykonywano od najwyższej do najniższej kondygnacji. Przykładem tej technologii budowy jest rozwiązanie rozpowszechnione w latach sześćdziesiątych XX wieku w Polsce, zaproponowane przez Andrzeja Skorupę oraz Jacka Burzyńskiego (według opisu podanego przez A. Pawłowskiego i I. Całego [9]). Pierwszym budynkiem zbudowanym w tej technologii jest budynek wysoki we Wrocławiu, nazywany od przyjętej technologii „trzonolinowcem” lub „wisielcem” [25]. Natomiast w Gdańsku, przykładem realizacji budynku wy-

sokiego w tej technologii jest zlokalizowany w pobliżu Dworca Głównego popularny „Zieleniak”, będący jednym z głównych symboli miasta (rys. 2a).

Obecnie wdrażana jest technologia z drewna konstrukcyjnego lub hybrydowa (na przykład połączenie drewna i betonu). Zbudowano już budynki punktowe o wysokości kilkudziesięciu metrów między innymi w Austrii, Norwegii i Kanadzie, gdzie są opracowywane projekty punktowców o wysokości 100 m i wyższych z wielowarstwowo sklejanych elementów drewnianych (rys. 6b).

Rozwój technologii w budownictwie dotyczy również projektowania i wykonawstwa posadowienia punktowców. Przykładem jest nowsza technologia zastosowana na budowie biurowca „Neptun” (o wysokości całkowitej 84,70 m) zlokalizowanego w Gdańsku Wrzeszczu przy al. Grunwaldzkiej (rys. 3b i 3c). W budynku „powiązano” technologię monolityczną żelbetową ze sprężoną słupowo-płytową. Fundament stanowi ścianka szczelinowa wykonana pod głównymi elementami konstrukcji w celu przenoszenia obciążeń pionowych (od ścian i stropów). Natomiast ściany zewnętrzne wyższych kondygnacji stanowią subtelne okienne ramy o dużych przeszklonych powierzchniach [33].

Innym przykładem realizacji w nowszej technologii punktowca – budynku wysokościowego jest złożony z dwóch wież o wysokości: 91 m – 29 kondygnacji i 125 m – 38 kondygnacji budynek „Sea Towers” w Gdyni (rys. 5). Punktowiec jest zlokalizowany w bliskim sąsiedztwie nabrzeża w Gdyni. Fundament budynku uformowano w postaci płyty o zmiennej grubości opartej na żelbetowych ścianach o wysokości 16 m wykonanych w zagęszczonym metodą wibroflotacji refulacie. Konstrukcję nośną zbudowano w technologii żelbetowej monolitycznej, zapewniając wymaganą stateczność oraz sztywność trzonów obu wież. Wieże połączono z sobą łącznikiem od 12. do 18. kondygnacji [32].

Bez względu na to gdzie i w jakiej technologii zbudowano punktowiec, i jak posadowiono, bardzo ważną cechą jest jego rzeczywista wysokość. Na świecie prawie do ostatnich lat XX wieku nie istniały oficjalne wspólne regulacje dotyczące klasyfikacji budynków pod względem wysokości i funkcjonowały różne nazwy takich budynków. W niektórych krajach istnieje niepisana reguła, według której za wieżowiec jest uznawany budynek o wysokości przekraczającej na przykład 150 metrów. W innych rejonach świata, niższy budynek może być uznany za drapacz chmur, jeżeli jest wyraźnie wyższy od pozostałych (też wysokich) w jego otoczeniu. Określenie wieżowca pojawiło się w latach osiemdziesiątych XIX wieku, gdy zastosowano nowe

technologie w budownictwie, które umożliwiły budowę bardzo wysokich wielopiętrowych budynków. Wieżowce przekraczające 300 m są czasami nazywane superwysokimi. Jednak, wieżowca nie powinno się mylić z wysokościowcem. Przyjmuje się, że wszystkie wieżowce są wysokościowcami, lecz tylko najwyższe wysokościowce są wieżowcami. Według firmy *EMPORIS Corporation* założonej w 2000 roku (z siedzibą w Hamburgu w Niemczech), światowego lidera rynku informacji zarządzającego danymi pochodzącymi z różnych źródeł o budynkach liczących 10 lub więcej kondygnacji, wysokościowcem jest budynek mający co najmniej 35 m wysokości z regularnym podziałem na kondygnacje [35]. Ponieważ od wielu lat trwa międzynarodowa rywalizacja państw, w tym architektów, konstruktorów, firm wykonawczych, sponsorów i właścicieli nieruchomości o palmę pierwszeństwa posiadania najwyższego budynku, zaistniała sytuacja wymusiła przyjęcie wspólnych podstawowych kryteriów pomiaru, opisu i parametrów „budynek wysokiego”. Dlatego, pod koniec XX wieku, międzynarodowa organizacja *Council on Tall Buildings and Urban Habitat* (powołana w 1969 roku) przedstawiła 4 rodzaje i definicje wysokości traktowane jako kryteria do oceny wysokości budynków [36]:

1. Wysokość do strukturalnego (architektonicznego) wierzchołka: ta kategoria była jedyną, która istniała do 1996 roku. Uznawana jest za główne kryterium oceny wysokości drapaczy chmur. Wysokość wieżowca mierzona jest do iglicy lub dachu (w przypadku braku iglicy), gdyż wysokość iglicy rzadziej jest zmieniana niż wysokość masztów, anten czy flag na szczytach budynków, które nie są brane pod uwagę w tym zestawieniu.
2. Wysokość do dachu.
3. Wysokość do najwyższego punktu (wysokość całkowita): do wysokości budynku wliczane są anteny, maszty i inne konstrukcje umieszczane na szczycie wieżowca.
4. Wysokość do najwyższej położonego piętra, które służy nie tylko obsłudze technicznej.

W Polsce definicję budynków wysokich oraz wysokościowych określa się na podstawie prawa budowlanego (*Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – prawo budowlane. Dz. U. 2018, poz. 1202, z późniejszymi zmianami*) oraz rozporządzenia i wytycznych do ustawy [20, 21a, 22]. Klasyfikację budynków ze względu na ich wysokość reguluje Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (*Dz. U. 2015, poz. 1422 z późniejszymi zmianami*) [22]. W tabl. 1 zaprezentowano podział budynków na grupy wysokościowe. Problem pomiaru wysokości poruszono też w [3].

Tabl. 1. Podział budynków na grupy wysokościowe w Polsce [22]

Lp.	Opis budynku	Nazwa	Symbol
1.	Do 12 m włącznie nad poziomem terenu lub mieszkalne o wysokości do 4 kondygnacji nadziemnych włącznie	Niskie	N
2.	Ponad 12 m do 25 m włącznie nad poziomem terenu lub mieszkalne o wysokości ponad 4 do 9 kondygnacji nadziemnych włącznie	Średniowysokie	SW
3.	Ponad 25 m do 55 m włącznie nad poziomem terenu lub mieszkalne o wysokości ponad 9 do 18 kondygnacji nadziemnych włącznie	Wysokie	W
4.	Powyżej 55 m nad poziomem terenu	Wysokościowe	WW



Rys. 1. Fragment panoramy Warszawy – Pałac Nauki i Kultury otoczony punktowcami (fot. pozyskana ze strony internetowej Panorama Warszawy, 20.09.2019 r.)



Rys. 2. Widok punktowców w Gdańsku

a) budynek Centrum Techniki Okrętowej „Zieleniak” (72,0 m) na etapie budowy w technologii „trzonolinowej”, 1971 rok, [25], b) elewacje „Zieleniaka” od strony południowo-wschodniej, c) Hotel Mercure „Hevelius” (70 m) i d) w głębi biurowiec „PROREM” (Organika) w Gdańsku przy ul. Rajskiej, (80 m), (fot. własne, wrzesień 2019 rok)

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 12.04.2002 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, wysokość budynku mierzy się od rzędnej terenu przy najniższej położonym wejściu do budynku lub jego części, znajdującym się na pierwszej kondygnacji nadziemnej budynku, do górnej powierzchni najwyższej położonego stropu (konstrukcji przekrycia) nad pomieszczeniem przeznaczonym na pobyt ludzi, łącznie z grubością izolacji cieplnej i warstwy ją osłaniającej. Nie uwzględnia się nadbudowanych na tym stropie pomieszczeń i konstrukcji technicznych. W praktyce występują też problemy wymagające prawnego rozwiązania co do maksymalnej wysokości zabudowy wynikającej z postanowień miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego [2]. Ponadto, już występujący trend zwiększania liczby podziemnych kondygnacji w nowych lub istniejących budynkach o atrakcyjnych lokalizacjach, może spowodować korektę/uzupełnienie definicji wysokości budynku i jej pomiaru, tym samym najwyższego budynku.

W Polsce do dzisiaj palmę pierwszeństwa najwyższego budynku (o charakterze biurowo-usługowym i potrzeb kultury) dzierży 42-piętrowy Pałac Kultury i Nauki w Warszawie o względnej wysokości całkowitej 237 m (wysokościowiec) i wysokości do dachu 187,68 m. Obiekt o architekturze w stylu art déco wzorowany na wznoszonych w Stanach Zjednoczonych drapaczach chmur zbudowano w latach 1952-1956 (rys. 1). Pierwsze budynki w takim stylu wzniesiono w Nowym Jorku w latach trzydziestych XX wieku. W latach sześćdziesiątych/siedemdziesiątych i późniejszych XX wieku, przy zastosowaniu różnych technologii na obszarze całego kraju, zbudowano bardzo dużo budynków wysokich (o wysokości powyżej 25 m) i wysokościowych (o wysokości powyżej 55 m). Były to obiekty budowlane głównie o przeznaczeniu mieszkalnym i biurowym (w tym akademiki, hotele, biura projektów). Również w Trójmieście postawiono stosunkowo dużo budynków wysokich i wysokościowych znacznie wyższych niż 55 m. Na rys. 1 do 5 pokazano kilka przykładów, między innymi w różnych fazach budowy



Rys. 3. Widok wysokościowców w Gdańsku – Wrzeszczu przy al. Grunwaldzkiej

a) w głębi plac budowy na początkowym etapie realizacji budynku „Neptun” widziany ze stropodachu budynku „Olimp”, 2013 rok, b) budynek „Neptun” (84,70 m) w budowie oraz w głębi po prawej stronie budynek „Olimp”, c) stanowisko skanera w wykopie osłoniętym ścianką szczelinową rozpartą [6], d) kompleks 4 budynków – wieże „Quattro Towers” (55 m) przy ul. Partyzantów, 2011 rok, w sąsiedztwie budynku „Olimp” (55 m), 1969 rok (fot. własna wrzesień 2019 rok)

Tabl. 2. Budynki wysokościowe w Warszawie (według inżynieria.com)

Zrealizowane budynki o wysokości powyżej 100 m (wysokościowce)	
Pałac Kultury i Nauki	237 m
Warsaw Spire	220 m
Warsaw Trade Tower	208 m
Złota 44	192 m
InterContinental Warszawa	164 m
Cosmopolitan Twarda 2/4	160 m
Rondo 1	159 m
Q22	155 m
Warsaw Financial Center	143 m
Centrum LIM	140 m
Chałubińskiego 8	140 m
Intraco I	138 m
Spektrum Tower	128 m
Łucka City	120 m
Błękitny Wieżowiec	120 m
Atlas Tower	116 m
Central Tower	115 m
Novotel Warszawa Centrum	111 m
Złote Tarasy	105 m
Babka Tower	105 m
Ilmet	103 m
Budynki o wysokości powyżej 100 m (wysokościowce) w realizacji	
Varso	310 m
Warsaw Unit	202 m
Skyliner	195 m
Generation Park	180 m
SkySawa	155 m
Mennica Legacy Tower	141 m
Generation Park	140 m
The Warsaw Hub	2×130 m
Spark	130 m
Forest	120 m
B4	120 m

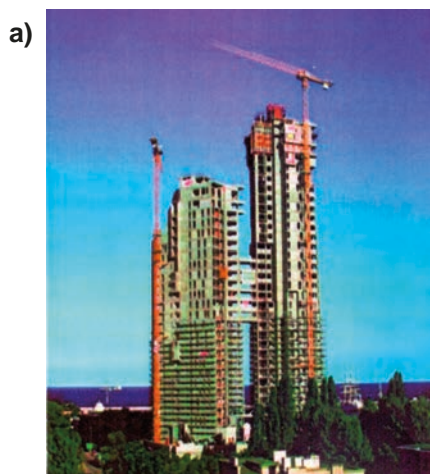
i eksploatacji. Natomiast w Warszawie zbudowano już ponad 20 budynków wysokościowych o wysokości ponad 100 m, a w realizacji jest budynek o projektowanej wysokości 310 m (tabl. 2).

W Europie najwięcej budynków wysokościowych zbudowano w Federacji Rosyjskiej, Wielkiej Brytanii, Niemczech i Francji. Obecnie najwyższy europejski budynek o wysokości 462 m znajduje się w Sankt-Petersburgu, zlokalizowany w dzielnicy „Łachta Centr”, popularnie nazywany Kukurydzą, 2018 rok (rys. 6, wiki łachta centr). Natomiast w grupie „superwysokich” budynków w świecie (o całkowitej wysokości) są:

1. Burj Khalifa – 828 m w Zjednoczonych Emiratach Arabskich, 2010 rok,
2. Shanghai Tower – 632 m w Chinach, 2017 rok,
3. Abraj al-Bajt – 601 m w Arabii Saudyjskiej, 2011 rok,
4. Ping An Finance Center – 599,3 m w Chinach, 2017 rok,
5. Lotte World Tower – 554,8 m w Korei Południowej, 2017 rok,
6. One World Trade Center – 541,4 m w USA, 2014 rok.



Rys. 4. Widok od ul. Kaszubskiej wysokościowca w Gdańsku – Oliwie, „Olivia Star”, 2018 rok (156,0 m) (fot. własna, wrzesień 2019 rok)



Rys. 5. Widok dwuwieżowego wysokościowca „Sea Towers” (125,50 m bez iglicy) w Gdyni a) w czasie budowy, od strony lądu oraz b) po zakończeniu budowy, od strony wody, 2018 rok [34]

a)



b)



Rys. 6. Najwyższe budynki

a) w Europie w Sankt-Petersburgu „Łachta Centr” 462 m, 2018 rok (strona wiki łachta centr) oraz b) w świecie w Dubaju „Burj Khalifa” 828 m, 2009 rok [26]

a)



b)



Rys. 7. Widok budynku z drewna Mjøstårnet w Brumunddal w Norwegii (a) (fot. Jens Haugen/Anti)

oraz wizualizacja projektowanego w Kanadzie punktowca o konstrukcji drewnianej (b) (fot. Dvice.com) [strona internetowa: Najwyższe budynki z drewna ...]

zaś w fazie projektowania są budynki o konstrukcji stalowo-żelbetonowej w technologii szkieletowo-monolitycznej o wysokości 1600 m w Arabii Saudyjskiej nad brzegiem Morza Czerwonego i 1007 m w Japonii. W Stanach Zjednoczonych, kraju o największej liczbie wieżowców, budowany jest na południowych obrzeżach nowojorskiego Central Parku najwyższy apartamentowiec świata o wysokości 472 m. Widok budynku z drewna w trakcie budowy o wysokości 85,4 m w Brumunddal w Norwegii i wizualizację projektowanego w Kanadzie punktowca z drewna o wysokości 100 m pokazano na rys. 7.

PRACE GEODEZYJNE PODCZAS OBSŁUGI GEODEZYJNEJ BUDOWY

Według Rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie standardów technicznych wykony-

wania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (Dz. U. nr 263, poz. 1572 z późniejszymi zmianami) [20] prace geodezyjne na potrzeby budownictwa, w tym geodezyjnej obsługi inwestycji budowlanych (oraz nieobowiązującej Instrukcji [18]), swoim zakresem obejmują:

- wykonywanie geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych,
- opracowywanie i przekazywanie wyników geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (PZGiK).

Zagranicą mogą obowiązywać inne przepisy dotyczące zakresu prac geodezyjnych na rzecz budownictwa wynikający ze struktury i umiejscowienia służ geodezyjnych w danym kraju.

W Polsce geodeci zajmujący się obsługą inwestycji wykonują dodatkowo szereg czynności oraz pomiarów na każdym etapie robót, w zależności od rodzaju i rozmiaru wznoszonego obiektu budowlanego. Na początku procesu inwestycyjnego projektant wraz z inwestorem zleca geodecie wykonanie mapy do celów projektowych (MDCP) – zaktualizowanej mapy zasadniczej, uzupełnionej treścią z pomiarów sytuacyjno-wysokościowych. Mapa do celów projektowych według § 6.1 zawartego w *Rozporządzeniu 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. 1995 nr 25 poz. 133) powinna zawierać:

- elementy stanowiące treść mapy zasadniczej,
- granice władania (własności) nieruchomości (działek),
- opracowane geodezyjnie linie rozgraniczające tereny o różnym przeznaczeniu, linie zabudowy oraz osie ulic, dróg i tym podobne, jeżeli zostały ustalone w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego lub w decyzji o ustaleniu warunków zabudowy i zagospodarowania terenu,
- usytuowanie zieleni wysokiej ze wskazaniem pomników przyrody,
- usytuowania innych obiektów i szczegółów wskazanych przez projektanta, zgodnie z celem wykonywanej pracy.

Geodeta respektuje też zapisy Rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. nr 75, poz. 690 z późn. zm.) [19]. W razie potrzeby zadaniem geodety jest również rozgraniczenie i uregulowanie prawne ewidencji gruntów. Następnie, po wykonaniu wszystkich prac związanych z opracowaniem kartograficznym, należy złożyć operat do Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego (PZGiK) odpowiedniego dla obszaru danej inwestycji. Po otrzymaniu uwierzytelnienia mapy geodeta przekazuje ją inwestorowi. Kolejnym etapem procesu inwestycyjnego jest opracowanie projektu obiektu budowlanego oraz etap budowy, na przykład budynku typu punktowiec, w którym bardzo ważne zadanie przypada geodetom wykonującym obsługę geodezyjną.

W Polsce dość liczna kadra inżynierska budowlana i geodezyjna od połowy XX wieku nabywała doświadczenie podczas wznoszenia w kraju różnych obiektów budowlanych oraz pracując na dużych inwestycjach zagranicą. Dlatego też bez większych problemów geodeci prowadzili obsługę geodezyjną budynków wysokich i wysokościowców wznoszonych w Polsce. Jednocześnie wyniki pomiarów uzyskanych podczas obsługi geodezyjnej były (i nadal są) wykorzystywane przez projektantów w analizie stateczności i przemieszczeń budynków o coraz większej wysokości na kolejnych etapach ich realizacji oraz w trakcie eksploatacji.

Do trudnych zadań geodezyjnych należą pomiary w trakcie obsługi wysokich i wysokościowych budynków zaprojektowanych w lokalizacji o gęstej zabudowie. Zaś szczególnym wyzwaniem dla geodetów jest obsługa geodezyjna i pomiary kontrolne przemieszczeń budynków „superwysokich”. Ze względu na złożone obciążenia działające na te budynki geodezyjne pomiary kontrolne przemieszczeń powinny być prowadzone od chwili rozpoczęcia budowy i rozszerzone o monitoring przemieszczeń

wznoszonego budynku w układzie przestrzennym. W przypadku budowy wysokich sztywnych na stabilnych fundamentach występują w przybliżeniu liniowe zależności między osiadaniami i wychyleniem od pionu. Jednak w przypadku budynków „superwysokich” liniowe zależności między osiadaniami i przemieszczeniami nie występują. Zatem liczba i lokalizacja punktów pomiarowych powinna uwzględniać przestrzenny układ budynku oraz położenie charakterystycznych przegród poziomych i pionowych z uwzględnieniem kolejnych etapów wznoszenia konstrukcji. Jednocześnie bardzo ważne jest, aby zapewnić stabilne osnowy pomiarowe i punkty dowiązania/odniesienia oraz „niezawodny” nowoczesny sprzęt geodezyjny.

Już w latach pięćdziesiątych XX wieku (ponad 60 lat temu) w publikacji [16 i 17] przedstawiono obsługę geodezyjną między innymi budowy wieżowców oraz większych obiektów przemysłowych. Szczegółowo opisano stosowany sprzęt i urządzenia geodezyjne oraz metody pomiaru stosowane podczas prac geodezyjnych na nietypowych obiektach budowlanych we wspomnianych latach.

W latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku w czasie obsługi geodezyjnej budynków wysokich nadal używano dostępnych precyzyjnych instrumentów, głównie optycznych, oraz angażowano wielozmianowe kilkusobowe zespoły pomiarowe. Używane powszechnie wówczas instrumenty wymagały dużo wysiłku i czasu oraz bardzo doświadczonej kadry, aby uzyskać normowe dokładności podczas tyczenia, montażu i całej obsługi budynków wysokich. Jednak pewnym udogodnieniem była łatwość w dostępie do otwartego terenu w rejonie wznoszonego punktowca, na którym zakładano osnowy i korzystano z nich przez cały okres budowy. Ze względu na to, że współczesne punktowce są coraz wyższe i bardzo często wznoszone w gęstej zabudowie miejskiej, geodeci muszą stosować autorskie rozwiązania, przestrzegając jednocześnie obowiązujących przepisów i dokładności wyników pomiarów. Pomiary muszą być wykonywane z zastosowaniem nowoczesnych technologii oraz drogiego nowoczesnego sprzętu, który umożliwia wykonanie obserwacji i pozwala skrócić czas wykonania pomiaru. Pomiaram geodezyjnym przemieszczeń budynków wysokich i budowli wysmukłych poświęcone są między innymi prace: [2, 5, 9, 10, 16, 17] i opublikowane prace dyplomowe [6, 7, 8, 11].

Przykładowo, podczas obsługi geodezyjnej budynku „Neptun” w Gdańsku – Wrzeszczu firma NORDGEO z Gdańska ze względu na gęstą zabudowę miejską i sąsiedztwo arterii drogowej oraz kolejowej korzystała z nieregularnej osnowy pomiarowej, której część punktów zamontowano między innymi w postaci tarczki i pryzmatów na stropodachach sąsiednich wysokich budynków odległych około 250 m. Stanowiła ona zagęszczenie osnowy lokalnej, wcześniej założonej przez firmę „DIAZ z Gdańska dla potrzeb obsługi geodezyjnej robót ziemno-fundamentowych. Na poszczególnych kondygnacjach wznoszonego budynku prowadzono pomiary metodą „wolnego stanowiska”, używając tachimetru Leica Viva TS15 o charakterystyce [22]: powiększenie lunety 30x, poczwórna kompensacja osi, dokładność pomiaru kąta poziomego H_z i pionowego $V - 5''$ ($15''$), pomiar odległości – ciągły (absolutny), zasięg na pryzmat okrągły – do 3500 m, zasięg bez reflektora – do 400 m. Wykonując pomiar w dwóch położeniach lunety uzyskano dokładność wyznaczenia każdego punktu osnowy 0,3 mm. Natomiast w trakcie obsługi geodezyjnej punktowca „Sea Towers” w Gdyni doświadczona

firma DIAZ z Gdańska używała w trakcie pomiarów pionowości tachimetru Leica TS02 plus 7" o następującej charakterystyce podanej w [23]: powiększenie lunety 30x, czteropunktowa kompensacja, dokładność pomiaru kąta poziomego Hz i pionowego V – 7" (20°), pomiar odległości – ciągły (absolutny), zasięg na przyzmat – do 3500 m, zasięg bezlustrkowy – do 500 m. Do niwelacji precyzyjnej używano niwelatora kodowego DNA03 [21] i niwelatora optycznego Carl Zeiss Jena Ni 007, uzyskując dokładność wykonania pomiaru $\pm 0,3$ mm/km, a dokładność pomiarów osiadania punktowca 0,5 mm. Wykorzystując opisane nowoczesne instrumenty i technologie, obsługę geodezyjną, wspomniane firmy, prowadziły na innych wysokościowych budynkach oraz na obiektach wielkokubaturowych, w tym między innymi na dużych stadionach sportowych wznoszonych w Trójmieście.

Poza wcześniej opisanym podstawowym zakresem prac geodezyjnych na pierwszym etapie realizacji budynków wysokich i wysokościowych – punktowych, szczególne znaczenie ma dostosowanie sprzętu i metod pomiarów geodezyjnych do różnych technologii stosowanych w kolejnych etapach realizacji, geometrii konstrukcji i geometrii budynku, w tym organizacja pomiarów w trakcie oraz po jej zakończeniu. Istotne jest też, aby przed rozpoczęciem inwestycji przeprowadzić ocenę stanu sąsiednich budynków oraz zainstalować punkty kontrolowane na tych obiektach. Dopiero wtedy można przystąpić do pomiarów związanych z wykonaniem wykopu oraz fundamentów. Osnowa pozioma powinna być dostępna z placu budowy i wznoszonego budynku. Repery powinny być zlokalizowane poza strefą oddziaływania prac budowlanych, aby uniknąć przemieszczenia pionowego tych punktów. Ponieważ po wykonaniu głębokiego wykopu pod fundament w dniu wykopu mogą wystąpić przemieszczenia gruntu, na przykład wypiętrzenie, w związku z tym należy założyć repery kontrolowane oraz wykonać pomiar zeroowy, względem którego będą określone przemieszczenia gruntu i fundamentów. Następnie należy wytyczyć osie fundamentów i główne osie budynku. W celu ułatwienia przebiegu prac budowlanych należy wyznaczyć również punkty, które są niezbędne lub ułatwią pracę wykonawcy, na przykład: narożniki ścian, środki słupów oraz przecięcia się osi lub tak zwane wskaźniki. W kilku widocznych i dostępnych miejscach na budowie powinno być określone zero budowlane, od którego geodeta będzie przenosił wysokości. Inne pomiary, które mogą być wykonywane na kolejnych kondygnacjach są związane z tyczeniem obrysu bądź osi ścian wewnętrznych. Po wykonaniu stropu należy wykonać pomiar inwentaryzacyjny, aby określić, czy rzędna górnej płaszczyzny jest zgodna z projektem. Ze względu na szybkość i wymaganą dokładność geodeci wykonują obecnie wymienione pomiary używając tachimetru.

Kolejnym rodzajem pomiaru wykonywanym przez geodetę jest cykliczny pomiar pionowości elementów konstrukcji i przenoszenie wysokości. Przykładowo, nierównomierne rozłożenie ciężaru stropów na kolejnych kondygnacjach może wywoływać odchylenie budynku od osi pionowej. Również montaż elementów o dużych wymiarach oraz o znacznym ciężarze wymaga pomiaru kontrolnego wykonywanego w czasie rzeczywistym. Podpory słupowe powinny być pionowane podczas budowy oraz ich montażu w fundamencie. Tak samo trzon budynku musi być wykonany zgodnie z projektem, aby mógł przenosić obciążenia, które zaprojektowano. Dodatkowymi czynnikami występującymi w trakcie pomiarów są nierównomierne nasłonecznienie oraz

podmuchy wiatru na dużych wysokościach, które mają wpływ nie tylko na punkty dowiązania, ale i na stabilność stanowiska pomiarowego. Szczególnie wysoka temperatura wywołuje w betonie zmianę jego struktury – beton rozszerza się, co, poza negatywnym wpływem na jego wytrzymałość i trwałość, wywołuje „przemieszczenie” w zależności od kierunku nasłonecznienia budynku. Należy w sposób ciągły kontrolować pionowość budynku, a poszczególne deskowania stropów i szalunki słupów muszą być pod stałą kontrolą geodezyjną, tak aby zachować stosowane w budownictwie tolerancje montażu i przemieszczeń elementów oraz całego budynku. Ponadto należy uwzględnić wpływ refrakcji, temperatury i oddziaływania dynamicznego na wyniki pomiaru. W okresowej analizie zachowania punktowca należy korzystać z wyników pomiarów pionowości i osiadania wykonanych w tym samym czasie i w takich samych warunkach pogodowych. Po zakończeniu budowy punktowca należy bezwarunkowo wykonać pomiary inwentaryzacyjne (powykonawcze) w celu sprawdzenia zgodności geometrii budynku z projektem i wprowadzonymi zmianami. Poza tym, ze względu na znaczne obciążenie podłoża na stosunkowo małej powierzchni oraz zmienne wychylenia budynku od osi pionowej, należy wykonywać geodezyjne okresowe pomiary kontrolne i kontynuować je przez cały okres użytkowania budynku wraz z monitoringiem z użyciem metod niegeodezyjnych.

MONITORING PUNKTOWCÓW METODAMI NIEGEODEZYJNYMI – FIZYKALNYMI

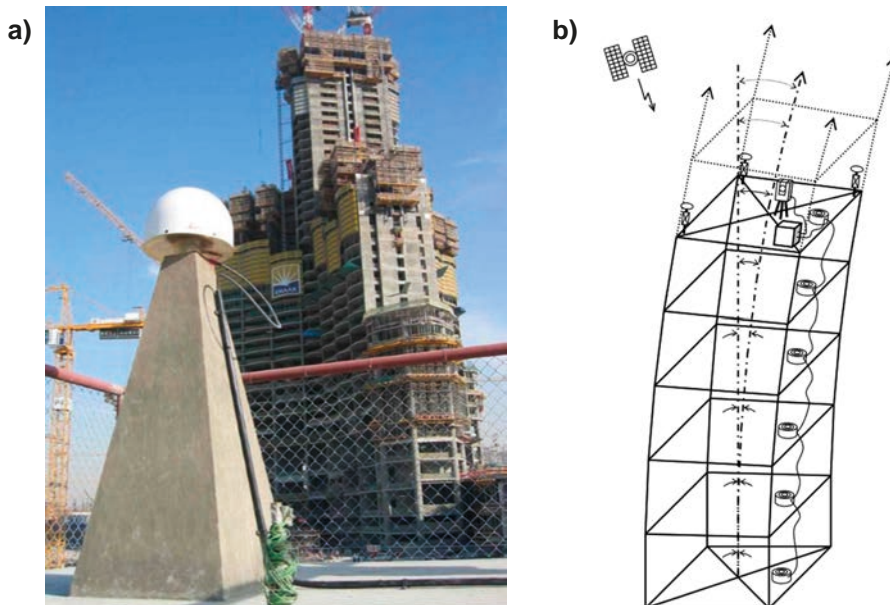
Do pomiaru zmiennych przemieszczeń punktowców: osiadania i wychylenia powinno stosować się ciągle obserwacje z użyciem różnych rozwiązań i sprzętu pomiarowego. W pomiarach pionowości należy odnosić się do wcześniej założonej jednolitej osnowy wysokościowej, korzystając na przykład z GPS. Należy optymalnie i z uwzględnieniem technologii budowy i etapów realizacji przed rozpoczęciem inwestycji w porozumieniu z projektantem oraz wykonawcami uzgodnić rozmieszczenie punktów kontrolowanych i lokalizację odbiorników GPS (punkty narożne i centralne stropów) w powiązaniu z siecią GNSS. System monitorowania wraz z centrum kontroli (serwerem) należy włączyć w cały układ obserwacji, który należy realizować od rozpoczęcia inwestycji. Przykład rozmieszczenia zastosowanego rozwiązania pomiarowej osnowy wysokościowej na budowie Burj Khalifa pokazano na rys. 8 [5].

Pomiary geodezyjne wykonywane podczas prac budowlanych wieży na wysokości 140 kondygnacji wykazały maksymalne osiadanie budynku rzędu 30 milimetrów (prognozowane były dwa razy większe), a odchylenie od pionu w najwyższym punkcie około 1,5 m, które w porównaniu do wysokości budynku było wartością dopuszczalną.

Od dość dawna używane są i wciąż udoskonalane o nowe rozwiązania elektryczne oraz elektroniczne urządzenia/przyrządy służące do wyznaczania przemieszczeń budynków/budowli w sposób ciągły, które stosuje się do monitorowania punktowców.

Charakteryzują się one wystarczająco dużą dokładnością pomiaru wychylenia. Spośród produkowanych w kraju i dostępnych można wymienić:

- szczelinomierze indukcyjno-transformatorowe do pomiaru szerokości rozwarcia szczelin, działające na zasadzie



Rys. 8. Widok budowy najwyższego punktowca na świecie Burj Khalifa oraz: a) punkt osnowy pomiarowej i b) schemat rozmieszczenia urządzeń do pomiaru pionowości [1, 5]

różnicowej o dokładności odczytu 0,002 mm oraz błędzie pomiaru około 0,5% maksymalnego zakresu pracy;

- klinometry z drgającą struną (z wahadłem) do wyznaczenia wychylenia obiektu budowlanego w osi pionowej lub poziomego elementu konstrukcji budowlanej, działające na zasadzie rejestracji zmiany częstotliwości drgań poprzecznych wywołanych wychyleniem budynku, o dokładności około 1% zakresu pomiarowego $0^\circ \div 1^\circ$ czyli około 0,6”;
- inklinometry tensometryczne (z obciążnikiem) działające w sposób podobny jak klinometry, ale wyposażone są w tensometr wykonujący pomiar zmiany odkształcenia cięgną w postaci zmiany napięcia wprost proporcjonalnej do zmiany wychylenia budynku, o dokładności pomiaru 5” i zakresie pomiarowym $0^\circ \div 1^\circ$;
- laserowe roboty pomiarowe z możliwością pełnego obrotu głowicy laserowej wokół dwóch osi, pozwalające skanować budynek, w których zastosowano dalmierz, robot z oprogramowaniem i procesorem oraz wewnętrznym komputerem.

Ponadto, w ramach współpracy z firmami specjalistycznymi można wybrać nowe przyrządy, w których wykorzystano ultradźwięki i inne technologie.

PODSUMOWANIE

W Polsce opublikowane są materiały zawierające opis i zalecenia związane z budową i obsługą geodezyjną budowli smukłych oraz budynków wysokich i wysokościowych, lecz dotyczą one najczęściej problemu widzianego przez autorów z pozycji danej branży. Jest jednak potrzeba całościowego ujęcia problemu realizacji punktowców wznoszonych w różnych technologiach, w tym między innymi hybrydowej i drewnianej z drewna konstrukcyjnego, które mają zwiększoną podatność na wychylenia od pionu i deformacji, a zatem wymagają zasto-

sowania odpowiedniego doboru technik pomiarowych i sprzętu geodezyjnego.

W zakresie monitorowania przebiegu budowy najwłaściwszym podejściem w realizacji punktowców jest wcześniejsze, to znaczy już na etapie przygotowania inwestycji we współpracy ze specjalistyczną firmą, opracowanie projektu i następnie wdrożenie systemu do automatycznego monitorowania przemieszczeń punktowców. Propozycje systemów monitorowania z oprogramowaniem uwzględniającym różne fazy przemieszczeń, w tym wczesnego ostrzegania oraz bezpieczeństwa, proponują między innymi znane w świecie firmy Leica oraz TOPCON współpracujące z przemysłem i branżą budowlaną. Zaprojektowane optymalne systemy monitoringu gromadzące w bazie wyniki badań geotechnicznych, pomiarów geodezyjnych i ciągłych obserwacji metodami fizykalnymi pozwolą nadzorowi budowlanemu i projektantowi skutecznie analizować bieżący „stan przemieszczeń” punktowca oraz prognozować dalszą jego współpracę z podłożem i reakcję na nietypowe obciążenia od wiatru, temperatury i innych obciążeń, w tym dynamicznych. Pomimo atrakcyjnych rozwiązań najwyższych budynków punktowych, to jednak coraz częściej są formułowane pytania co do sensu budowy i prowadzonej międzynarodowej rywalizacji, kto zbuduje najwyższy budynek, który dość często „nie komponuje” z otoczeniem w krajobrazie. Podobne pytanie odnoszą się również do budowy „zamkniętych supermiast” złożonych z takich punktowców. Stopniowo i co raz częściej nasuwa się skojarzenie z budową wieży Babel ...

LITERATURA

1. Abderlrazaq A., Kyung Jun Kim S. E., Jao Ho Kim. Brief on the Construction Planning of the Burj Dubai Projekt, Dubai, UAE. 8th World Congress – Council of the Tall Buildings and Urban Habitat, Dubai 3rd-5th March, 2008.
2. Bryś H., Przewłocki S.: Geodezyjne metody pomiaru przemieszczeń budowli, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.

3. Bursztynowicz M.: Wskaźniki w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego. W świetle prawa. Maksymalna wysokość zabudowy. 15/16 str. Magazyn Nowa geodezja w praktyce. Nr 44/kwiecień 2019.
4. Grela M.: Posadowienie najwyższego budynku świata Burj Khalifa. Geoinżynieria drogi mosty tunele 3/2011.
5. Hayes D., Sparks I., Van Cranenbroeck J.: Core Wall Survey Control System for High Rise Buildings, Niemcy 2006.
6. Kanecka T., Brzóska G., Wymysłowski M.: Obsługa geodezyjna wysokich biurowców w warunkach miejskiej zabudowy. Archiwum Geomatyki. Monografia pod. red. Kurałowicza Z., Rozdział 2. Politechnika Gdańska. 2014.
7. Lew-Kiedrowski A. P., Kurałowicz Z.: Przemieszczenia budowli smukłych. Wyznaczanie metodą modelowania numerycznego z uwzględnieniem zmiany sztywności podłoża. Archiwum Geomatyki. Monografia pod. red. Kamińskiego W., Rozdział 3. Politechnika Gdańska. 2010.
8. Marcinkowska B., Wymysłowski M.: Obsługa geodezyjna osiedla wysokich budynków. Archiwum Geomatyki. Monografia pod. red. Kurałowicza Z., Rozdział 4. Politechnika Gdańska. 2016.
9. Pawłowski A., Cała I.: Budynki wysokie, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
10. Pawłowski W.: Metodyka identyfikacji struktury przestrzennej elementów obiektu budowlanego w aspekcie potrzeb diagnostycznych, Zeszyty Naukowe Nr 871 Politechniki Łódzkiej, Łódź 2001.
11. Postek B.: Budynki wysokie i wysokościowe – geodezyjne pomiary przemieszczeń. Praca dypl. inż. – maszyn. WILiŚ Politechnika Gdańska, 2019 r.
12. Poulos H. G., Bounce G. Foundation Design for the Burj Dubai – the World's Tallest Building. 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August 11-16, 2008.
13. Prawo budowlane. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. (tekst jedn. Dz. U. z 2019 r. poz. 1186, 1309, 1524, 1696, 1712)
14. Prawo geodezyjne. Ustawa z dnia 17maja 1989r. Dz. U. Nr 30 poz. 163 (tekst jedn. Dz. U. z 2019 r. poz. 725, 730, ze zm.)
15. Salgado R., Basu D., Gavin K., Kumar S., Alvarez G.M.E. and Ahmad S. F. Analysis, Design, Testing and Performance of Foundations. General Report for Session 1. 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August 11-16, 2008.
16. Tarnowski K.: 526.99:624.131.3:526.954.3(438.11) Geodezyjne pomiary odkształceń wieżowców ze szczególnym uwzględnieniem prac prowadzonych na P.K.iN.
17. Tarnowski K. Geodezyjne pomiary odkształceń przy badaniach geologicznych i gruntowych na terenie Pałacu Kultury i Nauki im. Stalina w Warszawie. Prace Instytutu Geodezji Kartografii, Tom III, zeszyt 2 (6), Warszawa 1955 r.
18. Główny Geodeta Kraju: Instrukcja Techniczna G-3 Geodezyjna obsługa inwestycji, Warszawa, 1988.
19. Rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. nr 75, poz. 690 z późn. zm.)
20. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (Dz. U. nr 263, poz. 1572 z późn. zmian.)
21. Leica DNA03/DNA10 - Instrukcja użytkownika, Leica Geosystems AG, Szwajcaria 2008.
22. Leica Viva TS15 – Instrukcja użytkownika, Leica Geosystems AG, Szwajcaria 2008.
23. Leica TS02 plus – Instrukcja użytkownika, Leica Geosystems AG, Szwajcaria 2008.
24. <https://www.britannica.com/technology/theodolite>
25. http://www.bryla.pl/bryla/1,85299,7455628,Trzonolinowiec_zwany_wisielcem_Jedyny_taki_budynek.html
26. http://www.bryla.pl/bryla/1,85298,7417840,Najwyzszy_budynek_swiatea_Burj_Khalifa_Burj_Dubai_html
27. <http://www.burjkhalifa.ae/en/the-tower/structures.aspx>
28. <http://chodor-projekt.net/encyclopedia/budynki-wysokie/#ogolny-przeglad-budynkow-wysokich-na-swiecie-i-w-polsce>
29. <https://www.gedanopedia.pl/index.php?title=ZIELENIAK>
30. <http://www.geotekst.pl/artykuly/budowy-swiatea/posadowienie-najwyzszego-budynku-swiatea-828-m-burj-khalifa>
31. <http://www.investkomfort.pl/zrealizowane/sea-towers/>
32. http://www.inzynierbudownictwa.pl/technika,materiały_i_technologie,artykul,bare ty,5930
33. <https://m.trojmiasto.pl/wiadomosci/Tak-wyglada-Olivia-Star-najwyzszy-budynek-w-Trojmiescie-n103134.html> i <http://www.investkomfort.pl/zrealizowane/sea-towers/>
34. <http://skyscraperpage.com>
35. <http://www.emporis.com>
36. <http://www.zoominfo.com>
37. <http://www.ctbuh.org>