

# Budynek wysokościowy

Mgr inż. Michał Rogowski, dr hab. inż. Jolanta Anna Prusiel – promotor, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka

## 1. Wprowadzenie

Budynki wysokościowe są obiektami budowlanymi budzącymi podziw i respekt ludzi. Ich budowa jest procesem złożonym, wymagającym doświadczonej i wykwalifikowanej kadry inżynierskiej, a na etapie projektowania zgranego zespołu projektowego: architektów, konstruktorów oraz inżynierów odpowiedzialnych za przeróżne instalacje. Budowa wysokościowców nie zawsze ma ekonomiczny sens, jednak zwiększają one prestiż miasta, w którym powstają i dlatego są chętnie budowane w największych metropoliach. Również zamożne firmy często decydują się na budowę wysokiego budynku, aby zlokalizować w nim swoją siedzibę. Rozwój nauki i techniki umożliwia budowanie coraz to wyższych drapaczy chmur. Najwyższy obecnie budynek na świecie to Burj Khalifa w Dubaju o wysokości 828 m (rys. 1). Mimo iż wynik ten wydaje się imponujący, to w budowie jest jeszcze wyższy drapacz chmur – Jeddah Tower w Arabii Saudyjskiej. Budynek ten ma przekroczyć magiczną barierę 1000 m, a jego budowa przekroczy koszt 1,2 mld dolarów [15].



**Rys. 1.** Najwyższy obecnie budynek świata Burj Khalifa w Dubaju – 828 m, ZEA, 2010 [15]

## 2. Przegląd literatury z zakresu projektowania budynków wysokościowych

### 2.1. Definicja i podział budynków ze względu na wysokość

Definicja budynku wysokościowego zależy od kontynentu, na którym zrealizowany jest dany obiekt. Literatura zagraniczna nie wyszczególnia pojęcia „budynek wysokościowy”, a raczej „budynek wysoki” (ang. *Tall building*). W Europie Zachodniej dolna granica wysokości takiego budynku to 90–100 m [3]. W USA granica ta wynosi około 100–120 m. Ponadto stosunek wysokości budynku do jego szerokości wynosi

od 4:1 do 7:1. W budynkach bardzo wysokich zależność ta może być przekroczona, lecz nie powinna być większa niż 12:1. Wysokość drapacza chmur mierzy się do poziomu podłogi najwyższej kondygnacji, do dachu lub do najwyższego punktu. W Polsce Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [6] wprowadza następujący podział budynków ze względu na wysokość:

- budynki niskie (N) – wysokość do 12 m lub do 4 kondygnacji nadziemnych włącznie,
- budynki średniowysokie (SW) – wysokość od 12 do 25 m lub ponad 4 do 9 kondygnacji mieszkalnych włącznie,
- budynki wysokie (W) – wysokość od 25 do 55 m lub ponad 9 do 18 kondygnacji nadziemnych włącznie,
- budynki wysokościowe (WW) – wysokość ponad 55 m lub ponad 18 kondygnacji nadziemnych.

### 2.2. Systemy konstrukcyjne stosowane w budownictwie wysokim

Na przestrzeni lat rozwinęło się wiele systemów konstrukcyjnych w budownictwie wysokim, które z powodzeniem sprawdzają się w praktyce. Dobór konkretnego rozwiązania jest bardzo istotny, gdyż ma ścisły związek z projektowaną wysokością budynku. Im większa wysokość budynku, tym bardziej zaawansowany system konstrukcyjny należy zastosować.

- **System ramowy** – główną konstrukcję budynku stanowią płaskie lub przestrzenne ramy o węzłach sztywnych. Połączenia bez możliwości obrotu zapewniają sztywność przestrzenną układu na działanie sił poziomych. Takie budynki mogą mieć do 30 pięter. Do konstrukcji można wprowadzić płaskie stężenia ram, co znacznie podnosi sztywność budynku i pozwala zwiększyć wysokość (do 45 pięter). Jeśli do tego na kondygnacjach technicznych wykona się skratowania, jest możliwe budowanie w tej technologii aż 60 pięter.
- **System trzonowy** – w systemie tym większość obciążeń jest przenoszona przez centralnie położony trzon, który poza funkcją konstrukcyjną pełni również funkcję komunikacyjną oraz instalacyjną. Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje systemu trzonowego, tj. wieszarowy i wspornikowy. Pierwszy z wymienionych rozwiązań polega na przytwierdzeniu do trzonu konstrukcji wsporczej, do której przytwierdza się ciężna podtrzymujące kondygnacje drapacza chmur. Natomiast w przypadku systemu wspornikowego na trzonie jest opierana wspornikowa konstrukcja podtrzymująca stropy i słupy. Zaletą wymienionych wyżej rozwiązań jest

## PRACE DYPLOMOWE

uwolnienie rzutu kondygnacji od elementów konstrukcyjnych. Takie budynki osiągają wysokość do 45 kondygnacji. Obecnie najczęściej stosowany jest jednak układ trzonowo-szkieletowy, a budynki w nim wybudowane osiągają wysokość do 60 kondygnacji.

• **System „trzon w trzonie”** – rozwiązanie przejściowe pomiędzy konstrukcją trzonową i powłokową. Budynki wysokościowe budowane w tym systemie osiągają 180–300 m, tj. do 90 kondygnacji. Przy takich wysokościach sam trzon staje się zbyt smukły, by samodzielnie przenosić obciążenia. Należy więc zapewnić jego współpracę z powłoką zewnętrzną, która przenosi znaczną część oddziaływań. Pozwala to zwiększyć sztywność przestrzenną budynku, a co za tym idzie zmniejszyć wychylenia.

• **System powłokowy** – w budynkach powłokowych trzon jest zbyt wiotki, by efektywnie uczestniczyć w przenoszeniu obciążeń. Główną konstrukcją nośną staje się więc powłoka zewnętrzna składająca się z gęstej siatki słupów. Połączenia tych słupów z ryglami projektuje się jako sztywne. W niektórych przypadkach występuje konieczność zastosowania skratowania w płaszczyźnie elewacji. Nie wpływają one korzystnie na wygląd budynku, ale pozwalają znacznie zwiększyć jego sztywność. Ustroje powłokowe osiągają wysokość 60–100 kondygnacji, a w przypadku powłok skratowanych nawet do 140 kondygnacji.

• **Megastruktury** – charakterystyczny ustrój konstrukcyjny złożony z kilku powłok na modularnej siatce. Taki układ konstrukcyjny charakteryzuje duża sztywność, więc stosowany jest w bardzo wysokich wieżowcach. W megastrukturach rezygnuje się z wewnętrznych trzonów, co powoduje znaczny wzrost rozpiętości i grubości stropów. W tej technologii wznosi się budynki nawet do 120 kondygnacji. Stworzenie modularnej siatki słupów o zagęszczonym podziale pozwala na bardziej wyrównany rozkład naprężeń pod fundamentem, co jest korzystne ze względu na jego wykonanie [5].

• **System megakolumn** – z racji na spore ograniczenia w kształtowaniu elewacji budynków powłokowych oraz znacznej powierzchni zabudowy w przypadku megastruktur do budowy najwyższych wieżowców wymyślony został system megakolumn. Konstrukcja budynków wysokościowych w tym systemie składa się z masywnego trzonu i współpracujących z nim megakolumn, położonych po obrysie zewnętrznym budynku. Megakolumny są to skrzynie stalowe wypełnione żelbetem. Ich współpraca z trzonem jest zapewniona poprzez potężne kratownice stalowe zwane „outriggers”. Budynki wzniesione w tym systemie cechuje bardzo duża sztywność przy równoczesnej dowolności w kształtowaniu elewacji.

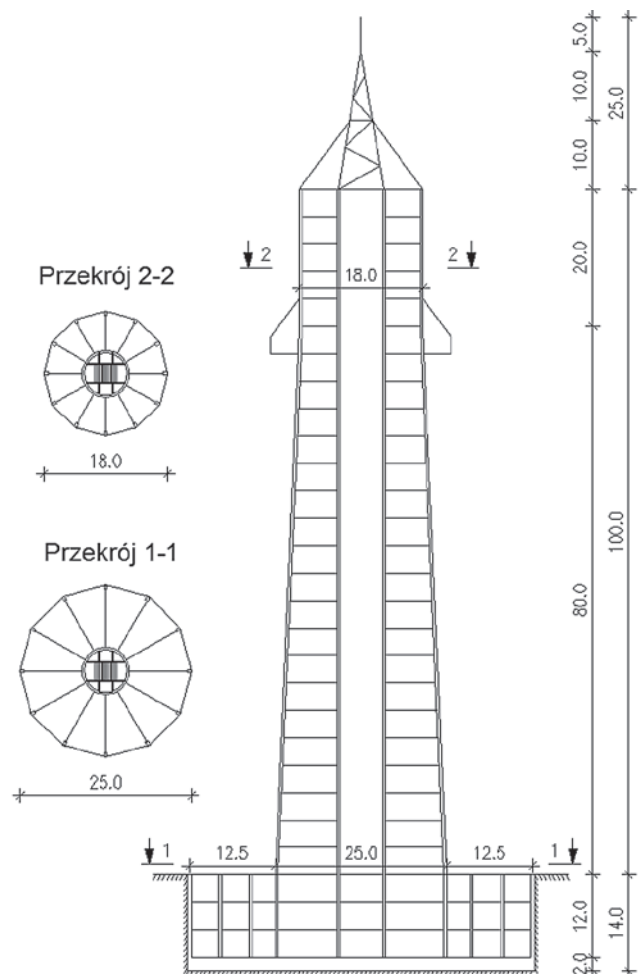
• **Systemy niekonwencjonalne** – budynki wysokościowe, których nie można zakwalifikować do żadnego z omówionych wyżej systemów nazywamy niekonwencjonalnymi. Kreatywność architektów oraz rozwój i powszechność programów numerycznych pozwala na odstępstwo od utartych schematów, co sprawia, że powstaje coraz więcej takich

budynków. Ponadto inwestorom często zależy na oryginalności ich obiektu. Do najbardziej znanych wieżowców niekonwencjonalnych należy Burj Khalifa w Dubaju (rys. 1).

## 3. Założenia architektoniczno-budowlane

Projektowany budynek wysokościowy zostanie wybudowany w systemie trzonowo-szkieletowym. W tym układzie konstrukcyjnym zewnętrzny szkielet współpracuje z trzonem, co pozwala na znaczne ograniczenie wychyleń oraz zastosowanie mniejszej grubości trzonu.

W projektowanym budynku wysokościowym przewidziano 25 kondygnacji nadziemnych oraz 3 podziemne (rys. 2). Całkowita wysokość budynku wynosi 125 m. Przekrój poprzeczny obiektu w części nadziemnej to dwunastokąt foremny. Zastosowanie takiego przekroju zapewnia bryle budynku bardziej opływowy kształt, co powoduje lepszą aerodynamikę obiektu. Całkowita szerokość budynku w poziomie



Rys. 2. Schematyczne przekroje projektowanego budynku, wymiary w [m]

przyziemia wynosi około 25 m, a stosunek szerokości do wysokości (do stropu nad najwyższą kondygnacją) – 4. Wieżowiec zwęża się na wysokości dwudziestu początkowych kondygnacji nadziemnych, aż do osiągnięcia szerokości 18 m. Na wysokości pięciu ostatnich kondygnacji budynek ma stały przekrój. Pochylenie słupów zewnętrznych korzystnie wpływa na pracę statyczną budynku związaną z działaniem sił poziomych. Głównym elementem nośnym budynku jest centralnie położony cylindryczny trzon żelbetowy o średnicy 7 m (w osiach). Wznosi się od fundamentu, aż do stropu nad ostatnią kondygnacją. Trzon współpracuje ze szkieletem zewnętrznym poprzez stropy belkowo- płytowe. Słupy i rygle szkieletu zewnętrznego początkowych 20 kondygnacji zaprojektowano jako żelbetowe. W celu redukcji masy obiektu pięć ostatnich kondygnacji ma słupy i rygle stalowe. Na dwudziestej kondygnacji przewidziano taras widokowy o konstrukcji wspornikowo-wieszarowej, tj. żelbetowe wsporniki utwierdzone w słupach szkieletu zewnętrznego, podwieszane za pomocą cięgien stalowych do wyższej kondygnacji. Podziemia budynku zaprojektowano w systemie płytowo-słupowym. Przekrój obiektu poniżej poziomu „0” to kwadrat, a szerokość wynosi 40 m w osiach konstrukcyjnych ścian szczelinowych. Zastosowanie ścian szczelinowych zabezpiecza budynek przed działaniem wody oraz znacznie ułatwia prowadzenie robót ziemnych podczas budowy. Elementy te zaprojektowano jako współpracujące ze stropami podziemia oraz płytą fundamentową. Konstrukcję dachu budynku stanowi stalowy szkielet z rdzeniem kratowym opartym na trzonie. Najwyższe 5 metrów wieżowca to wieża radiowo-telewizyjna.

Przeznaczenie użytkowe poszczególnych kondygnacji budynku wysokościowego [2]:

- kondygnacje podziemne: parking,

- kondygnacja 1: ogólnodostępny hall, lokale usługowe,
- kondygnacje 2–19: powierzchnie biurowe,
- kondygnacja 20: restauracja, taras widokowy,
- kondygnacje 21–25: apartamenty mieszkalne.

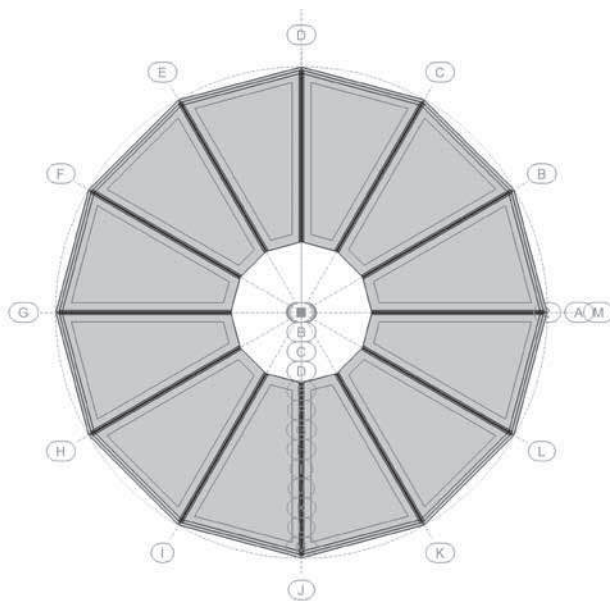
## 4. Analiza statyczna budynku

### 4.1. Wybór rozwiązania konstrukcyjnego

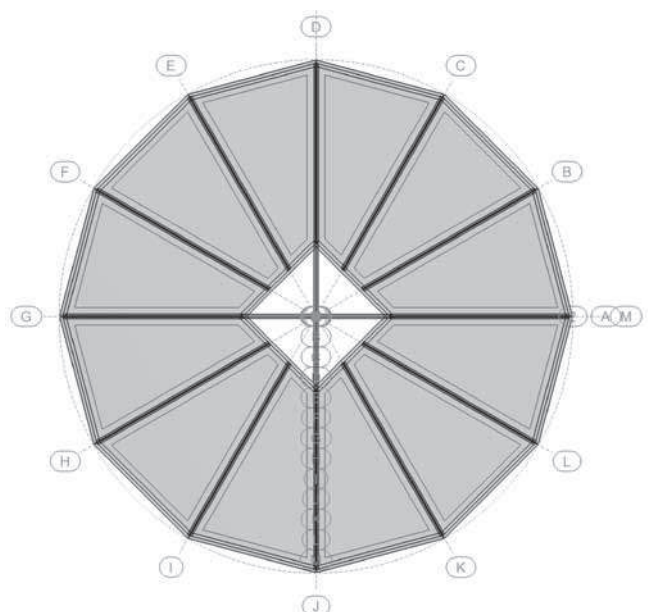
W pracy przeanalizowano dwie koncepcje rozwiązania konstrukcyjnego. Koncepcja nr 1 to budynek wysokościowy w systemie trzonowym ze współpracującym szkieletem zewnętrznym (rys. 3). Zasadniczym elementem nośnym jest centralnie położony żelbetowy trzon. Na każdej kondygnacji od trzonu odbiegają promieniście rozchodzące się belki stalowe, które na drugim końcu łączą się ze słupami szkieletu zewnętrznego.

Całkowita pionowa reakcja modelu koncepcji nr 1 wynosi 75 906 kN. Przekroje zastosowane w pierwszym kroku analizy statycznej budynku:

- żelbetowy trzon o grubości 35 cm, beton C 40/50,
  - żelbetowe słupy szkieletu zewnętrznego – 70×100 cm, beton C 35/45,
  - stalowe słupy szkieletu zewnętrznego – HEM 600, S 235,
  - żelbetowe rygle szkieletu zewnętrznego – 30×50 cm, beton C 35/45,
  - stalowe rygle szkieletu zewnętrznego – HEB 400, S 235,
  - stalowe belki stropowe – IPE 600/IPE 400, S 355,
  - stropy żelbetowe o grubości 20 cm, beton C 25/30,
  - konstrukcja dachu – gorącownicowane rury stalowe, S 355.
- Koncepcja nr 2 to budynek wysokościowy w systemie ramowym (rys. 4). Zasadniczym elementem nośnym są krzyżujące się dwie główne ramy żelbetowo-stalowe. Trzon został zastąpiony centralną żelbetową ramą przestrzenną. Na każdej kondygnacji do ramy centralnej dochodzą stalowe

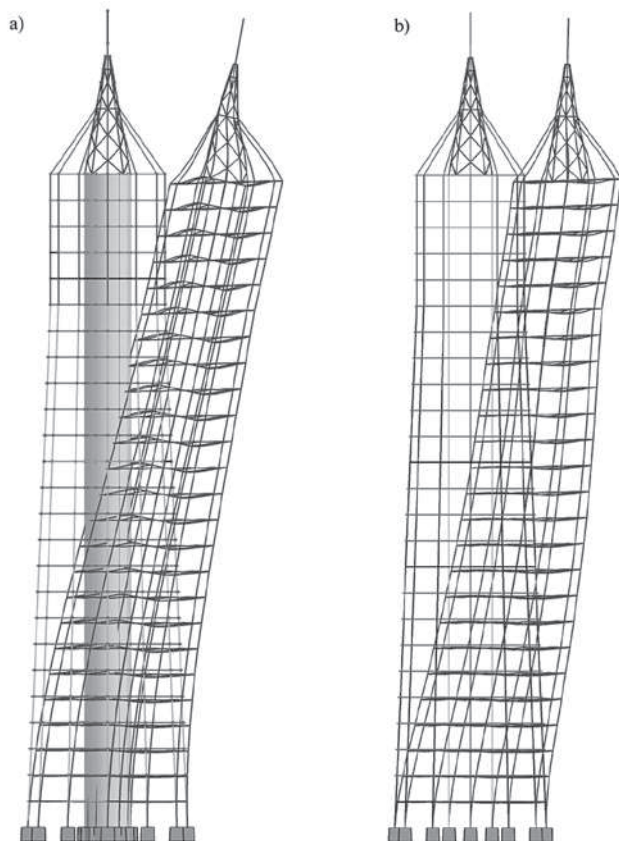


Rys. 3. Koncepcja nr 1 – przekrój poziomy konstrukcji budynku



Rys. 4. Koncepcja nr 2 – przekrój poziomy konstrukcji budynku





Rys. 5. Deformacje konstrukcji budynku: a) koncepcja nr 1, b) koncepcja nr 2

belki stropowe, które na drugim końcu łączą się ze słupami zewnętrznymi.

Całkowita pionowa reakcja modelu koncepcji nr 2 wynosi 75 171 kN, czyli jest bardzo zbliżona do reakcji z modelu nr 1. Przekroje zastosowane w analizie statycznej budynku:

- żelbetowe słupy ramy centralnej – 100×100 cm, beton C 35/45,
- żelbetowe rygle ramy centralnej – 30×60, beton C 35/45,
- żelbetowe słupy zewnętrzne – 70×110 cm, beton C 35/45,
- stalowe słupy zewnętrzne – HEM 700, S 235,
- żelbetowe rygle zewnętrzne – 30×60 cm, beton C 35/45,

Tabela 1. Zestawienie wybranych wyników obliczeń statycznych

z	Przemieszczenie a		Stosunek a/z	
	Koncepcja nr 1	Koncepcja nr 2	Koncepcja nr 1	Koncepcja nr 2
m	cm	cm	–	–
100,0	9,6	14,0	1/1042	1/714
80,0	7,3	11,2	1/1096	1/714

Tabela 2. Porównanie wartości całkowitej reakcji poziomej od oddziaływania wiatru

	PN-EN 1991-1-4 [9]	Generator obciążenia wiatrem programu Robot Structural Analysis [17]	Autodesk Flow Design [18]
Całkowita reakcja pozioma	2162,10 kN	2171,37 kN	2254,36 kN

- stalowe rygle zewnętrzne – HEB 500, S 235,
- stalowe belki stropowe – IPE 600/IPE 400, S 355,
- stropy żelbetowe o grubości 20 cm, beton C 25/30,
- konstrukcja dachu – gorączowalcowane rury stalowe, S 355.

Przeprowadzono przy użyciu programu Robot Structural Analysis 2018 [17] obliczenia statyczne obu rozwiązań konstrukcyjnych budynku (koncepcja nr 1 i 2), stosując model MES 3D. W analizie porównawczej uwzględniono jedynie ciężar własny konstrukcji obiektu i obciążenie wiatrem [7, 8, 9]. Do porównania dwóch koncepcji odczytano przemieszczenia poziome konstrukcji na wysokości 80 oraz 100 m nad ziemią (rys. 5, tab. 1).

Już po analizie deformacji budynku widać, że koncepcja nr 1 zachowuje się znacznie lepiej niż koncepcja nr 2. Liczbowe wyniki przemieszczeń poziomych potwierdzają, że jest to korzystniejsze rozwiązanie konstrukcyjne. Do dalszej analizy statyczno-wytrzymałościowej oraz optymalizacji konstrukcji przyjęto zatem koncepcję nr 1.

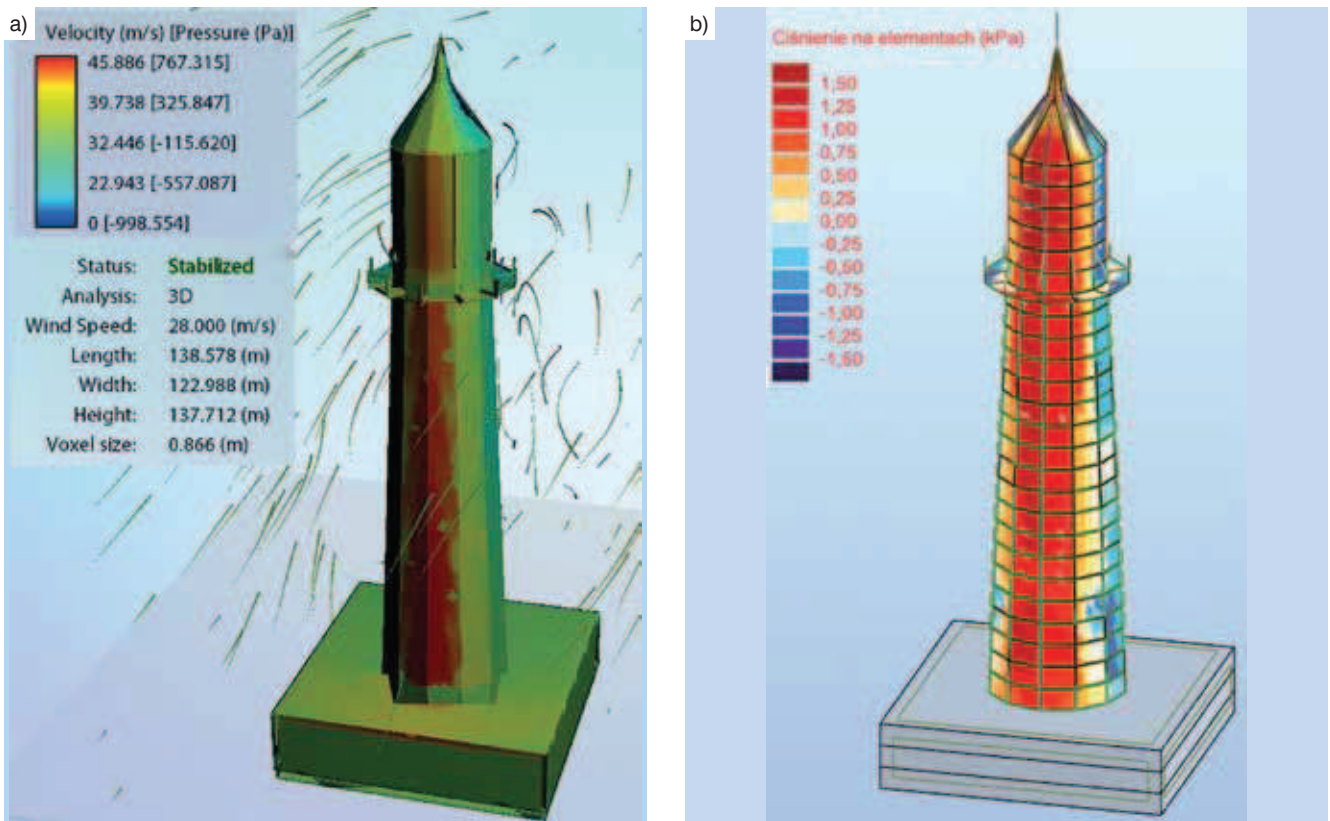
#### 4.2. Warunki posadowienia i model pracy podłoża

Z racji na stosunkowo niewielką jak na drapacz chmur wysokość, budynek posadowiono na płycie fundamentowej. Założono wiercenie geotechniczne na głębokość 30 m poniżej poziomu terenu. Zwierciadło wody gruntowej znajduje się na głębokości 6 m p.p.t. Na podstawie [1] opracowania przyjęto podłoże warstwowe.

Płytę fundamentową zamodelowano elementem płytowym na podłożu sprężystym (model Winklera). Zastosowano powierzchnię podporę, która automatycznie przyjmuje sprężynę w każdym węźle siatki ES. Poziom posadowienia przyjęto na głębokości 14 m p.p.t. Całkowita reakcja fundamentu to 312 772 kN, przy wymiarach 50×50 m, co przełożyło się na wartość współczynnika sprężystości  $K_z = 3821,69 \text{ kN/m}^3$ .

#### 4.3. Szczegółowa analiza obciążenia wiatrem

Skorzystano z dostępnego w programie Robot Structural Analysis 2018 [17] do analizy statycznej generatora obciążenia wiatrem i uzyskane wyniki przyjęto do dalszych obliczeń. Wspomniany wyżej moduł przypomina w swoim

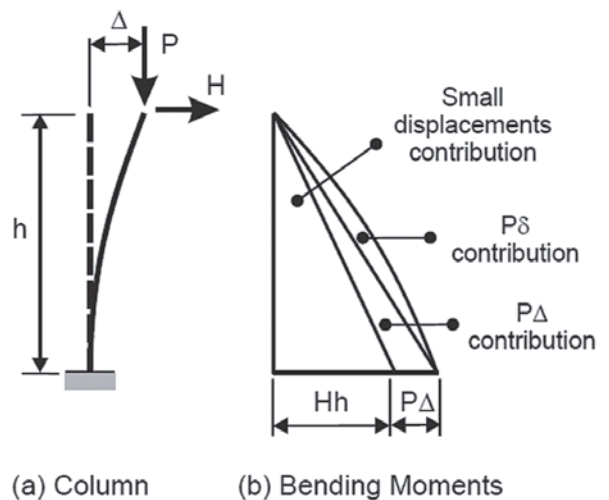


Rys. 6. Porównanie map ciśnienia na powierzchniach zewnętrznych budynku: a) Autodesk Flow Design [18], b) Robot Structural Analysis [17]

działaniu tunel wiatrowy, co jest dużą zaletą, gdyż w przypadku większości budynków wysokościowych obciążenie wiatrem wyznaczone jest za pomocą takich tuneli. Profil wiatru po wysokości oraz wartość początkową przyjęto zgodnie z obliczonymi wcześniej charakterystycznymi szczytowymi ciśnieniami prędkości wiatru. Uzyskane wyniki (mapy ciśnienia oraz całkowitą reakcję poziomą) porównano z wynikami uzyskanymi w alternatywnym (Autodesk Flow Design [18]) numerycznym tunelu do przepływu wiatru (tab. 2). Analizując rysunek 6, można zauważyć, że rozkład parcia wiatru w obu wariantach obliczeń jest podobny. W przypadku programu Autodesk Flow Design [18] występują jednak mniejsze wartości ciśnienia. Ma to związek z tym, że nie jest tu możliwe zastosowanie profilu wiatrowego, co zostało zrobione w przypadku obliczeń drugiego wariantu. Do dalszej analizy przyjęto wyniki z programu Robot Structural Analysis [17]. Ciśnienie powstałe w obrębie każdej okładziny zostało automatycznie uśrednione oraz przyłożone do konstrukcji w postaci obciążeń powierzchniowych oraz krawędziowych.

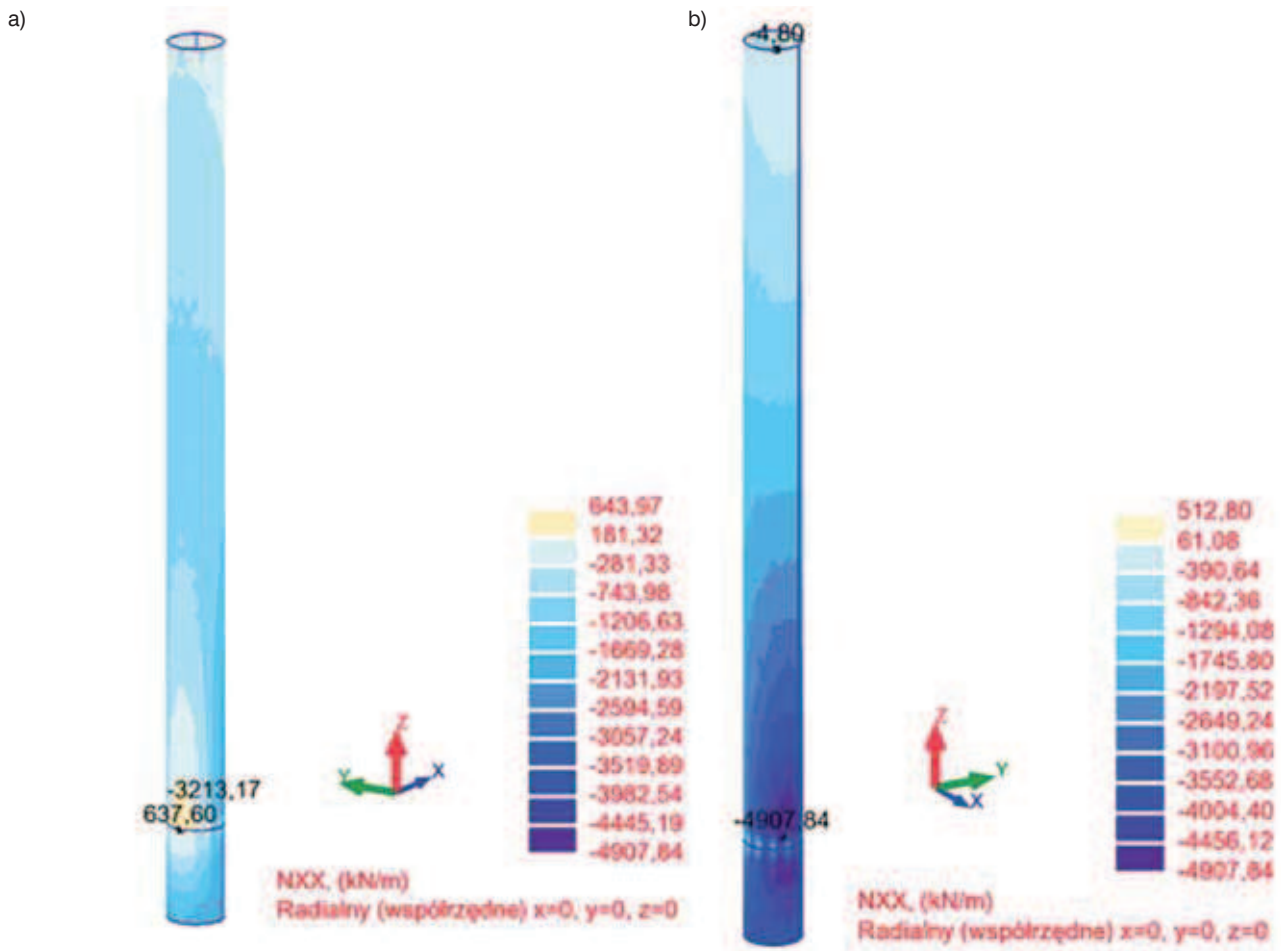
#### 4.4. Zastosowane rodzaje analizy statycznej

Jak podano w literaturze [4], budynki wysokościowe należy obliczać z uwzględnieniem wpływu efektów II rzędu, czyli analizy P- $\Delta$ . Dzieje się tak z powodu dużych sił osiowych oraz towarzyszących im znacznych przemieszczeń poziomych, co wywołuje dodatkowy moment zginający (rys. 7). Istnieje również pojęcie efektów P- $\delta$ , które wywołane są



Rys. 7. Idea efektów II rzędu [16]

lokalną deformacją pręta (pomiędzy węzłami). Efekty te stają się istotne przy bardzo smukłych konstrukcjach i w mniejszym opracowaniu zostaną pominięte. Ze względu na znaczne wydłużenie czasu obliczeń spowodowane aktywacją nieliniowej analizy P- $\Delta$  oraz brak w programie automatycznych kombinacji nieliniowych efekty II rzędu zostały uwzględnione wyłącznie do wymiarowania trzonu, słupów szkieletu zewnętrznego oraz sprawdzenia dopuszczalnych



Rys. 8. Siły południkowe w żelbetowym trzonie budynku: a) obwiednia górna, b) obwiednia dolna

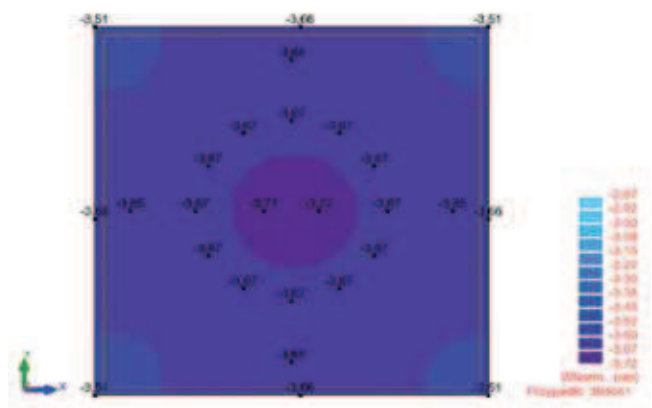
przemieszczeń poziomych. W pozostałych przypadkach wpływ tych efektów na obliczenia nie jest istotny, więc z powodzeniem można zastosować tu analizę liniową. Do sprawdzenia globalnej stateczności konstrukcji posłużono się nieliniową analizą wyboczeniową (ang. NLBA – *non-linear buckling analysis*). Mapy sił południkowych w trzonie budynku przedstawiono na rysunku 8. Wyniki te uwzględniają efekty II rzędu.

## 5. Wymiarowanie budynku

### 5.1. Stan graniczny nośności

W pracy wykonano szereg obliczeń w celu zwymiarowania elementów stalowych i żelbetowych konstrukcji budynku wysokościowego. W wielu przypadkach wyniki uzyskane za pomocą specjalistycznego oprogramowania zweryfikowano analitycznie [10, 11, 12, 13]. Wykonany zakres obliczeń:

- sprawdzenie nośności podłoża gruntowego, obrotu całego budynku oraz wymiarowanie zbrojenia w płycie fundamentowej,
- wymiarowanie zbrojenia w ścianie szczelinowej,
- sprawdzenie nośności cylindrycznego trzonu żelbetowego,
- wymiarowanie słupów stalowych oraz żelbetowych,
- wymiarowanie zbrojenia stropów,



Rys. 9. Mapa osiadania płyty fundamentowej

- wymiarowanie stalowych belek stropowych,
- wymiarowanie stalowych i żelbetowych rygli szkieletu zewnętrznego,
- wymiarowanie zbrojenia we wspornikach żelbetowych tarasu widokowego,
- wymiarowanie cięgien stalowych,
- wymiarowanie stalowej konstrukcji dachu,
- wymiarowanie połączeń i zakotwień stalowych.



**Tabela 3.** Przemieszczenia poziome projektowanego wieżowca

z	Przemieszczenie konstrukcji	
	Obliczone	Dopuszczalne
m	cm	cm
100,0	12,73	13,33
80,0	10,02	10,66
40,0	4,51	5,33

## 5.2. Globalne warunki SGU

Osiadania budynku obliczono dwoma niezależnymi programami: Autodesk Robot Structural Analysis 2018 [17] oraz GEO5 2017 – Fundament bezpośredni [19] i porównano uzyskane wyniki. Maksymalne przemieszczenie pionowe płyty fundamentowej dla kombinacji charakterystycznej wyniosło 3,72 cm (rys. 9). Zgodnie z [14] osiadanie budynków smukłych o wysokości powyżej 100 m należy ograniczyć do 15 cm, natomiast budynków powyżej 100 kondygnacji do 8 cm. Literatura [3] zaleca natomiast ograniczenie osiadań do wartości 5 cm, co wydaje się najbardziej racjonalnym rozwiązaniem. Podczas projektowania budynków wysokościowych często decydującym przy wymiarowaniu czynnikiem są przemieszczenia poziome konstrukcji. Dzieje się tak z powodu ogromnych sił poziomych działających na konstrukcję (np. wiatr czy sejsmika) oraz bardzo rygorystycznych warunków ograniczających przemieszczenia poziome. Obecne europejskie trendy projektowe zalecają obliczanie wieżowców na warunek wychylenia  $H/750$  [3] i takie ograniczenie zastosowano w niniejszym opracowaniu. Przemieszczenia obliczono według analizy II rzędu w trzech poziomach budynku: na wysokości 40, 80 oraz 100 m (tab. 3).

## 6. Podsumowanie

Praca zawiera zaawansowaną analizę statyczno-wytrzymałościową budynku wysokościowego. Wykonano obliczenia oddziaływania wiatrem trzema sposobami, w tym numerycznym modelem aerodynamicznym. Uwzględniono również obciążenie wyjątkowe w postaci uderzenia pojazdu. Zaproponowano dwa rozwiązania konstrukcyjne projektowanego obiektu, po analizie których wybrano bardziej efektywny wariant i na jego podstawie sformułowano zaawansowany trójwymiarowy model obliczeniowy konstrukcji. Ponadto w modelu uwzględniono współpracę konstrukcji z podłożem gruntowym, stosując podpory sprężyste zgodnie z teorią Winklera. Zastosowano 3 rodzaje analizy konstrukcji: liniową analizę sprężystą, nieliniową analizę P- $\Delta$  uwzględniającą efekty II rzędu oraz nieliniową analizę wyboczeniową do oceny globalnej stateczności budynku. Wygenerowano automatyczne normowe kombinacje obciążeń SGN i SGU, co pozwoliło na uwzględnienie dużej liczby przypadków. W opracowaniu wykorzystano również wiele różnego rodzaju programów inżynierskich, co w dobie

powszechnej informatyzacji należy uznać za w pełni uzasadnione. Istotną część opracowania to obliczenia wytrzymałościowe poszczególnych elementów budynku wysokościowego i optymalizacja konstrukcji. Wieżowiec zaprojektowano tak, aby jego wychylenie było możliwie jak najbardziej zbliżone do dopuszczalnego, które w warunkach europejskich obecnie zaleca się ograniczać do  $1/750$  wysokości. Osiadania budynku oszacowano dwoma alternatywnymi sposobami i uzyskano bardzo zbliżone wyniki. Wykonany model obliczeniowy wieżowca posłużył do wykonania dokumentacji projektowej. Za pomocą popularnego w technologii BIM formatu IFC przesłano geometrię budynku wysokościowego oraz wszelkie informacje materiałowe do programu do „detalowania” konstrukcji budowlanych Tekla Structures [20], w którym wygenerowano rysunki wykonawcze zaprojektowanych elementów konstrukcyjnych.

**Praca dyplomowa magisterska „Budynek wysokościowy” otrzymała Wyróżnienie Rady Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej w 2017 roku i została nagrodzona w Konkursie PZITB „Najlepsze Prace Dyplomowe Absolwentów Studiów Wyższych kierunku Budownictwo” w 2018 roku oraz w Konkursie Tekla BIM Awards 2018 organizowanym przez dystrybutora programu Tekla Structures – firmę Construsoft.**

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Kwiatkowski W., Gajko K., Ekofizjografia Białegostoku, opracowanie własne, Białystok, 2011
- [2] Neufert E., Podręcznik projektowania architektoniczno-budowlanego, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2012
- [3] Pawłowski A. Z., Cała I., Budynki wysokie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013
- [4] Taranath B. S., Structural Analysis and Design of Tall Buildings, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988
- [5] Youssef N., Megastructure: A New Concept For Structural Buildings. Modern Steel Construction, USA, 1991
- [6] Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie
- [7] PN-EN 1990:2004 Podstawy projektowania konstrukcji
- [8] PN-EN 1991-1-1:2004 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływanie ogólne, ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach
- [9] PN-EN 1991-1-4:2008 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływanie ogólne – oddziaływania wiatru
- [10] PN-EN 1992-1-1:2008 Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [11] PN-EN 1993-1-1:2006 Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [12] PN-EN 1993-1-8:2006 Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów
- [13] PN-EN 1997-1:2008 Projektowanie geotechniczne. Część 1-1: Zasady ogólne
- [14] PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [15] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Burdz\\_Chalifa](https://pl.wikipedia.org/wiki/Burdz_Chalifa)
- [16] <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/P-Delta+effect>
- [17] Autodesk Robot Structural Analysis 2018 – wersja studencka
- [18] Autodesk Flow Design – wersja edukacyjna
- [19] GEO5 2017 – Fundament bezpośredni
- [20] Tekla Structures 21 – wersja edukacyjna