

**Politechnika Krakowska**  
Wydział Architektury  
Instytut Projektowania Budowlanego  
Katedra Konstrukcji i Technik Budowlanych

**mgr inż. Roman Paruch**

ROZPRAWA DOKTORSKA

p.t.

**Strukturalne determinanty  
form architektonicznych współczesnych  
budynków wysokich**

Promotor:

**prof. dr hab. inż. arch. Janusz Rębielak**

Kraków, 2019 r.



<b>1.</b>	<b>Wstęp</b> .....	<b>6</b>
1.1.	Wprowadzenie .....	6
1.2.	Uzasadnienie wyboru tematu .....	7
1.3.	Krótki opis obecnego stanu badań .....	9
1.4.	Definicje podstawowych pojęć oraz stosowanych oznaczeń w rozprawie .....	10
1.5.	Cel i zakres pracy .....	13
1.6.	Tezy pracy .....	16
1.7.	Określenie metody badawczej .....	17
<b>2.</b>	<b>Zarys rozwoju historycznego budynków wysokich</b> .....	<b>18</b>
2.1.	Rola i funkcja obiektów wysokich w przestrzeni architektonicznej dawniej oraz obecnie .....	18
2.2.	Zarys przeglądu znaczących obiektów wysokich od czasów antycznych do połowy XIX wieku .....	20
2.3.	Opis ogólny systemów konstrukcyjnych oraz form architektonicznych obiektów wznoszonych od połowy XIX wieku do połowy wieku XX .....	27
2.4.	Charakterystyka ogólna podstawowych rodzajów systemów konstrukcyjnych budynków wysokich projektowanych i realizowanych od połowy XX wieku .....	34
2.5.	Obecne tendencje obserwowane w procesach projektowania budynków – zarys ogólny .....	41
<b>3.</b>	<b>Podstawowe wymogi procesu projektowania budynku wysokiego</b> .....	<b>43</b>
3.1.	Określenie i uzasadnienie zakresu tematycznego dotyczącego rozpatrywanych wymogów .....	43
3.2.	Uwarunkowania przestrzenne, historyczne i kulturowe .....	44
3.3.	Uwarunkowania społeczno-użytkowe, gospodarcze i ekonomiczne .....	57
3.4.	Uwarunkowania geologiczne .....	63
3.5.	Uwarunkowania funkcjonalno-użytkowe lub geometryczne .....	70
3.6.	Uwarunkowania materiałowe .....	76

3.7.	<i>Uwarunkowania wynikające z oddziaływania obciążeń zewnętrznych.....</i>	85
3.8.	<i>Uwarunkowania wynikające z zasad ekologii i najnowszych technologii ...</i>	97
<b>4.</b>	<b><i>Analiza nowoczesnych rodzajów struktur nośnych budynków wysokich .....</i></b>	<b>106</b>
4.1.	<i>Zdefiniowanie narzędzi badawczych przyjętych w celu przeprowadzenia analizy .....</i>	106
4.2.	<i>Określenie kryteriów doboru obiektów będących przedmiotem analizy ....</i>	106
4.3.	<i>Analiza wybranej grupy obiektów posiadających ramowe systemy nośne.....</i>	111
4.4.	<i>Analiza wybranej grupy obiektów posiadających trzonowe systemy nośne.....</i>	123
4.5.	<i>Analiza wybranej grupy obiektów posiadających wieszarowe systemy nośne.....</i>	139
4.6.	<i>Analiza wybranej grupy obiektów posiadających systemy nośne w postaci powłok ramowych pojedynczych oraz podwójnych określanych jako „trzon w trzonie” .....</i>	146
4.7.	<i>Analiza wybranej grupy obiektów zaprojektowanych jako megastruktury .....</i>	159
4.8.	<i>Analiza wybranej grupy obiektów zaprojektowanych w systemie megakolumn.....</i>	164
4.9.	<i>Analiza wybranej grupy obiektów o niekonwencjonalnych lub pionierskich systemach nośnych.....</i>	180
<b>5.</b>	<b><i>Analiza porównawcza najnowszych obiektów wysokich realizowanych za pomocą różnych rodzajów systemów konstrukcyjnych.....</i></b>	<b>184</b>
5.1.	<i>Określenie zakresu analizy oraz rodzajów kryteriów przyjętej oceny.....</i>	184
5.2.	<i>Współczesne obiekty wieżowe i wysokościowe .....</i>	186
5.3.	<i>Główne ośrodki geograficzne i geopolityczne .....</i>	194
5.4.	<i>Nakreślenie przewidywanych tendencji rozwojowych współczesnych budynków wysokich .....</i>	200
<b>6.</b>	<b><i>Podsumowanie i wnioski końcowe .....</i></b>	<b>207</b>
<b>7.</b>	<b><i>Spis literatury podstawowej .....</i></b>	<b>209</b>

7.1.	<i>Spis innych źródeł</i> .....	215
<b>8.</b>	<b><i>Aneks</i></b> .....	<b>218</b>
8.1	<i>Krótką analizą wybranych przykładów budynków wysokich opisującą ewolucję form architektonicznych i rozwoju systemów konstrukcyjnych</i> ...	218
Nr 1.	<i>Absolute World Building D</i> .....	219
Nr 2.	<i>Al Hamra Tower</i> .....	220
Nr 3.	<i>Burj Al Arab</i> .....	221
Nr 4.	<i>Burj Khalifa</i> .....	222
Nr 5.	<i>Capital City Moscow Tower</i> .....	223
Nr 6.	<i>Capital Gate Tower</i> .....	224
Nr 7.	<i>Cayan Tower</i> .....	225
Nr 8.	<i>Chelsea Tower</i> .....	226
Nr 9.	<i>China Zun</i> .....	227
Nr 10.	<i>Evolution Tower</i> .....	228
Nr 11.	<i>HQ Aldar Building</i> .....	229
Nr 12.	<i>International Commerce Center (ICC)</i> .....	230
Nr 13.	<i>Jin Mao Tower</i> .....	231
Nr 14.	<i>Kingdom Center</i> .....	232
Nr 15.	<i>KK100</i> .....	233
Nr 16.	<i>La Grande Arche</i> .....	234
Nr 17.	<i>Lotte World Tower</i> .....	235
Nr 18.	<i>Makkah Royal Clock Tower</i> .....	236
Nr 19.	<i>Millennium Tower</i> .....	237
Nr 20.	<i>New York Times Tower</i> .....	238
Nr 21.	<i>One World Trade Center</i> .....	239
Nr 22.	<i>Petronas Twin Tower 1 i 2</i> .....	240

<i>Nr 23. Shimao International Plaza</i> .....	241
<i>Nr 24. The Broadgate Tower</i> .....	242
<i>Nr 25. The Leadenhall Building</i> .....	243
<i>Nr 26. The Shard</i> .....	244
<i>Nr 27. Torre Glories (Torre Agbar)</i> .....	245
<i>Nr 28. World Trade Center (WTC)</i> .....	246
<i>Nr 29. 20 Fenchurch Street</i> .....	247
<i>Nr 30. 432 Park Avenue</i> .....	248

# 1. Wstęp

## 1.1. Wprowadzenie

Problemy dotyczące projektowania, wznoszenia i bezpiecznej eksploatacji budynków wysokich należą do stale aktualnych zagadnień badawczych w architekturze i budownictwie. Budownictwo wysokie łączy w sobie wiele różnych dziedzin nauki i techniki, dlatego prawidłowe rozwiązywanie jego złożonych zagadnień projektowych wymaga przeprowadzenia wielu studiów interdyscyplinarnych związanych z projektowaniem architektoniczno-konstrukcyjnym, uwarunkowaniami technicznymi i technologicznymi, zagadnieniami psychologicznymi, ekonomicznymi, kulturowymi oraz wieloma innymi. Jeden z twórców znanej na całym świecie "Szkoły Chicagowskiej" oraz prekursor współczesnych budynków wysokich, architekt Louis Henry Sullivan, mawiał określając budynek wysoki „*Obecna musi być w nim siła i moc wysokości. W każdym swoim calu musi być dumny i podrywać się do lotu, od czubka po fundament musi być całością bez jednej choćby linii sprzeciwu*”<sup>1</sup>. Współczesne realizacje budynków wysokich na całym świecie wpisują się w wygłoszone wyzwanie architekta Louis'a Henr'ego Sullivana. W całej prawie 150 letniej historii współczesnego budownictwa wysokiego odnajdujemy nowatorskie i zaskakujące rozwiązania, które stają się impulsem do dalszego rozwoju dyscyplin technicznych związanych z projektowaniem i realizacją wszelkich obiektów, nie tylko wysokich.

Profesor Waław Zalewski sformułował tezę: "*Kształt decyduje o jakości konstrukcji budowlanej. Znalezienie dobrego kształtu winno być główną troską architekta i konstruktora*"<sup>2</sup>. Przenikanie się obu dyscyplin wraz z ambicjami inwestorów, którzy reprezentują przedsiębiorstwa, miasta czy nawet państwa uwidacznia się w realizacjach budynków wysokich. Wysokość obiektu, a raczej jego wymiar symboliczny, jest odpowiedzią na coraz wyższe wymagania stawiane przez ludzi decydujących o podjęciu i przebiegu takiej inwestycji. Pościg za największą wysokością budynku nie powinien być celem w samym sobie, a raczej umożliwiać tworzenie obiektów o charakterze "ikonicznym", które przejdą do historii

---

<sup>1</sup> Cytat za L.H. Sullivan, "Lippincott's Magazine" Marzec 1896

<sup>2</sup> Allen A., Zalewski W. Form and forces. Designing efficient expressive. Wiley, Hoboken NJ 2010, s.622

budownictwa światowego. Wyzwanie takie podejmują czołowi projektanci światowi, tacy jak: Skidmore, Owings, Merrill (SOM), Kohn, Pedersen, Fox (KPF); Norman Foster; Cesar Pelli, Yeoh Ming Pei, Philip Jonson, Kisho Kurokawa, Jean Nouvel, Santiago Calatrava, Renzo Piano i inni [53]. Idea budowy budynków wysokich obecna jest we wszystkich zakątkach świata i stała się zagadnieniem globalnym. Wraz z początkiem, a następnie rozwojem i ewolucją współczesnego budownictwa wysokiego, toczy się zagorzała dyskusja pomiędzy zwolennikami a przeciwnikami zabudowy wysokiej w miastach. Idea "miast wertykalnych" zmieniająca sposób kształtowania sylwetki obszarów zurbanizowanych budzi często skrajne odczucia. Formy budynków, zarówno tych z początków okresu budownictwa wysokiego, jak i współczesnych realizacji, odzwierciedlają pojęcie urody, prestiżu lub wzbudzenia podziwu i zachwyty wśród odbiorców ich architektury.

Ewolucji formy architektonicznej budynku wysokiego oraz rozwój systemów konstrukcyjnych towarzyszy dążenie do uczynienia go proekologicznym wraz z stosowaniem zaawansowanych technologii określanych przez badaczy zagadnienia jako "*high-tech*", które związane są z ideą budynku inteligentnego i samowystarczalnego. Rozwój technik obliczeniowo-matematycznych oraz technologii konstrukcyjno-materiałowej pozwolił na kształtowanie unikalnych i niekonwencjonalnych form współczesnych budynków wysokich.

Dzisiejsze wieżowce tworzą nowoczesny "drugi poziom" [53] dużych miast, a zwłaszcza ich centrów handlowych i administracyjnych [12].

## **1.2. Uzasadnienie wyboru tematu**

Dążenie do wznoszenia coraz to wyższych budowli jest obserwowane od początków sztuki budowlanej przyjmującej tożsamościowo pierwotnie nazwy architektury lub inżynierii budowlanej. Wysokość bezwzględna ponad otaczającym terenem wraz ze znaczną smukłością obiektów wzniesionych przy zastosowaniu dostępnych wówczas materiałów i technologii budowlanej może być miernikiem poziomu cywilizacyjnego osiągniętego przez daną społeczność w danym okresie historycznym. Potrzeba budowania obiektów wysokich była i jest stale podsygnowana potrzebami racjonalnymi, uzasadnionymi funkcjonalnie i ekonomicznie, jak i

również czynnikami emocjonalnymi uwarunkowanymi także społecznie. Ograniczona wielkość działki, najczęściej związana z małymi wymiarami terenu dostępnego pod zabudowę w centrum miast, racjonalnie uzasadnia tendencję budowania wzwyż. Koncentracja budynków wysokich w centrach dużych ośrodków miejskich jest uzasadniona czynnikami ekonomicznymi, funkcjonalnymi i jest motywowana między innymi dążeniem do szybkiego i sprawnego przebiegu procesu bezpośredniej komunikacji ludzi i podmiotów gospodarczych. Zdarzenia losowe mające szeroki wpływ w ośrodkach silnie zurbanizowanych o dużym potencjalnie ekonomicznym, jak np. pożar Chicago w 1871 roku, stanowią niekiedy impuls do dynamicznego rozwoju technik budowania i ewolucji form architektonicznych budynków. Budynki wysokie są także materialną manifestacją potęgi inwestorów, którzy swą pozycję ekonomiczną, finansową i społeczną eksponują monumentalnymi budynkami, mimo iż koszty takich realizacji często nie mieszczą się w racjonalnej ekonomicznej kalkulacji.

Postęp naukowo-techniczny w wielu dziedzinach dokonany w szczególności w ostatnich trzech dekadach sprawił, iż dostępne współcześnie materiały konstrukcyjne charakteryzują się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi i użytkowymi. Współczesne technologie budowlane w połączeniu z najnowszymi rodzajami materiałów budowlanych skłaniają projektantów do podejmowania zamierzeń inwestycyjnych uważanych do niedawna za nierealne lub nieracjonalne.

Wielu ekspertów sądziło, że po 11 września 2001 roku, dniu w którym uległy zniszczeniu bliźniacze wieże World Trade Center w Nowym Jorku, nastąpi długotrwały regres budownictwa wysokościowego. Tak się jednak nie stało i zamiast tego obserwujemy jego dynamiczny rozwój, szczególnie w azjatyckich krajach Bliskiego i Dalekiego Wschodu. Braki ogólnodostępnych terenów budowlanych w centrach miast, przy mającej obecnie miejsce eksplozji demograficznej, czyni w tych regionach społecznie i ekonomicznie uzasadnioną potrzebę realizacji budynków wysokich. Ograniczone i sukcesywnie malejące zasoby łatwo dostępnych surowców materiałowych i energetycznych naszej Planety zmuszają do poszukiwania innowacyjnych metod projektowania i konstruowania, w celu zrealizowania obiektu budowlanego spełniającego coraz to wyższe wymogi ochrony środowiska naturalnego oraz pozwalającego na trwałą, bezpieczną i



wydajną ekonomicznie jego eksploatację. Budynki wysokie projektowane są obecnie najczęściej zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju, co pozwoli na zmniejszenie negatywnego wpływu takich obiektów na środowisko.

Przyjęcie właściwego rodzaju systemu konstrukcyjnego budynku wysokiego ma znaczący wpływ na wszystkie jego parametry funkcjonalne, użytkowe, ekonomiczne, jednak jego wybór jest także uwarunkowany wieloma bardzo różnymi czynnikami zewnętrznymi. Dlatego określenie optymalnego rodzaju systemu konstrukcyjnego dla danych celów projektowych jest zadaniem bardzo ważnym oraz złożonym. Wyróżnienie pewnych własności lub też cech charakterystycznych danego rodzaju systemu konstrukcyjnego może ułatwić dokonywanie takich wyborów dla określonych celów projektowych.

### **1.3. Krótki opis obecnego stanu badań**

Budynki wysokie są obiektami, w których łączą się ze sobą najbardziej spektakularne osiągnięcia w zakresie kształtowania formy architektonicznej, najnowsze technologie oraz niespotykane dotychczas w budownictwie powszechnym systemy konstrukcyjne. Wszelkie rozwiązania technologiczne zastosowane w budownictwie wysokim są następnie aplikowane do budynków i obiektów znacznie niższych. Wieżowce stają się prekursorem oraz nośnikiem najnowszych idei koncepcyjnych oraz praktycznych zastosowań projektowych dla budownictwa niskiego. Budynki wysokie o unikatowych formach architektonicznych pełnią także rolę spektakularnych manifestacji wysokiej rangi przedsiębiorstwa, miasta, państwa oraz całego regionu geograficznego, w którym są budowane. Budownictwo wysokie od czasów antycznych fascynowało społeczności ludzkie. Dowodem na to są choćby realizacje najstarszych wzniesionych piramid w Egipcie. Era nowożytna wnoszenia budynków wysokich rozpoczęła się dopiero w 2-giej połowie XIX i na początku XX wieku w Stanach Zjednoczonych w dwóch największych ośrodkach miejskich, takich jak Chicago i Nowy Jork. Dynamiczny rozwój budownictwa wysokiego obserwujemy obecnie szczególnie w Azji ze szczególnym wyróżnieniem Chin wraz z swoimi autonomicznymi regionami oraz na Bliskim Wschodzie, w takich krajach jak: Arabia Saudyjska i Zjednoczone Emiraty Arabskie.

Budynek wysoki wraz ze wszystkimi swoimi uwarunkowaniami projektowymi, ekonomicznymi i kulturowymi jest często dla projektantów ogromnym wyzwaniem w wielu obszarach projektowych.

Zaobserwowana dynamika ewolucji form architektonicznych oraz rozwiązań systemów konstrukcyjnych nie odzwierciedla się w sposób wystarczający w dostępnych pozycjach literatury naukowej i zawodowej. Najciekawszą wśród polskich publikacji, choć nieodnoszącą się bezpośrednio do podjętej w niniejszej dysertacji tematyki, jest moim zdaniem monografia [53]. Znaczna część istniejącej literatury zarówno polskiej, jak i angielskojęzycznej, odnosi się w sposób bardzo wąski w podjętej analizie zagadnienia problemowego, ze szczególnym uwzględnieniem opisu jednej lub co najwyżej kilku przykładów realizacji budynków wysokich. Zebrana przez autora literatura, podana w przypisach na końcu pracy, wskazuje potrzebę opracowania kompleksowego i spójnego, które jest podejmowane w niniejszej dysertacji. Analiza relacji powstawania współczesnej formy architektonicznej budynków wysokich oraz ich strukturalnych determinant wymaga podjęcia wielokryterialnych studiów nad tym zagadnieniem. Istniejące opracowania analityczne bardzo rzadko mają charakter porównawczy w skali globalnej połączonej ze stosowną analizą techniczną i konstrukcyjną. Przeprowadzenie szczegółowych badań wydaje się więc uzasadnione lub wręcz konieczne, obserwując dynamikę realizacji współczesnych budynków wysokich na całym świecie.

#### **1.4. Definicje podstawowych pojęć oraz stosowanych oznaczeń w rozprawie**

- a) **Budynek wysoki, wieżowiec, wysokościowiec** (ang: tall building, high-rise building, skyscraper) - określenia, które używane są w celu opisanie obiektu, w którym stosunek wysokości całkowitej do wielkości podstawy jest znaczący. Przedstawiona terminologia będzie zamiennie stosowana w niniejszej dysertacji, jednakże zawsze będzie dotyczyć tego samego rodzaju obiektu.
- b) **Budynek ekstremalny** (ang: extreme building) - określenie budynku wysokiego związane z rodzajem dużych wymiarów geometrycznych i olbrzymich wielkości sił zewnętrznych oddziałujących na obiekt.

- c) **Fundament** (ang: foundations) - część systemu konstrukcyjnego budynku, która jest zagłębiona poniżej otaczającego terenu. Podstawową funkcją "fundamentu" jest przeniesienie sił pionowych i poziomych w sposób bezpieczny na podłoże gruntowe.
- d) **Konstrukcja ramowa** (ang: framed structures) - ustrój nośny budynku, w którym obciążenia pionowe oraz poziome przenoszone są przez ramy konstrukcji stalowej lub żelbetowej. Połączenia elementów nośnych mają charakter sztywny lub przegubowy.
- e) **Konstrukcja trzonowa** (ang: core structures) - Ustrój nośny budynku, w którym siły pionowe i poziome są przenoszone na fundament za pomocą sztywnego trzonu. Najczęściej trzon w budynkach wysokich jest wykonany w konstrukcji żelbetowej.
- f) **Konstrukcja powłokowa** (ang: tube structures) - ustrój nośny budynku, w którym po obwodzie zewnętrznym utworzono ściany w postaci ram z ryglami, ram z dodatkowymi skartowaniami pełniącymi funkcję tężników lub powłok stalowych. Za twórcę systemu uznaje się światowej sławy inżyniera Fazlura Khana.
- g) **Konstrukcja dwupowłokowa** (ang: tube in tube) - ustrój nośny budynku określany, jako "trzon w trzonie". Praca konstrukcji budynku w tym systemie polega na współdziałaniu wewnętrznego trzonu z zewnętrzną ramową powłoką stalową lub żelbetową.
- h) **Sztywność przestrzenna** (ang: stiffness of building) - zdolność budynku do przenoszenia obciążeń zewnętrznych. W budynkach wysokich miarą sztywności przestrzennej jest wielkość wychylenia poziomego wierzchołka.
- i) **Obciążenia lub oddziaływania** (ang: external loads) - zestaw sił pionowych oraz poziomych powstałych od ciężaru własnego budynku wraz z obciążeniem użytkowym lub/i oddziaływaniami klimatycznymi i sejsmicznymi.
- j) **Szarpanie budynku [57]** - potoczne określenie dotyczące wychylenia wierzchołka wraz maksymalnym przyśpieszeniem drgań własnych, wywołane obciążeniem zewnętrznym. W budynkach wysokich dominującym obciążeniem zewnętrznym poziomym jest oddziaływanie wiatru (parcie,

ssanie, turbulencje, lub inne zjawiska aerodynamiczne). Występowanie znacznych wychyleń lub/i drgań własnych budynku może wpływać niekorzystnie na samopoczucie użytkowników.

- k) **Konstrukcja megastruktury** (ang: Modular Tube lub Bundle Tube Structures) - System konstrukcyjny stosowany dla najwyższych budynków. Cechą charakterystyczną jest rezygnacja z wewnętrznego trzonu. Układ nośny utworzony jest przez gęstą siatkę powłok modularnych. Za twórcę systemu megastruktury uznaje się inżyniera Fazlura Khana.
- l) **Konstrukcja megakolumn** – System konstrukcyjny oparty na współpracy megakolumn w postaci skrzyń żelbetowych o dużych wymiarach geometrycznych z wewnętrznym trzonem. Za twórcę rozwiązań konstrukcyjnych uznaje się konstruktorów z biura Thornton Tomasetti Engineers.
- m) **Szkoła chicagowska** – nurt określający tendencje i zasady w projektowaniu architektonicznym, w których dominującą formą budynku był kształt przypominający prostopadłościan z widocznym regularnym podziałem elewacji uzyskany poprzez uwidoczniony ustrój nośny. Na ścianach budynków zaprojektowanych przez architektów związanych ze "szkołą chicagowską" mocno akcentowano wszelkie detale architektoniczne, aby nadać dodatkowych cech formie obiektu. Przyjmuje się, iż nurt wczesno modernistyczny został zapoczątkowany w Chicago pod koniec XIX wieku i na początku XX wieku.
- n) **Smukłość budynku** - pojęcie opisujące zależność wysokości bezwzględnej do wymiaru rzutu podstawy budynku. W konstrukcjach powłokowych i dwupowłokowych („rura w rurze”) prawidłowa zależność zawiera się w przedziale **6-12** [53]. W przypadku konstrukcji trzonowej zależność określa wskaźnik **H** (wysokość) / **B** (wymiar boku trzonu) mniejszy niż **17-19** [53].
- o) **Eco-tech** – pojęcie określające rozwiązania techniczne i technologiczne stosowane w budynkach, które spełniają założenia pro-ekologiczne.
- p) **High-tech** – Stosowanie zaawansowanych rozwiązań technicznych związanych z funkcjonowaniem obiektu wysokościowego.
- q) „f” - oznacza wychylenie wierzchołka budynku wysokiego.

r) „H” – oznaczenie definiujące wysokość budynku.

### 1.5. Cel i zakres pracy

Realizacja budynków wysokich była zawsze, jak i jest obecnie trudnym wyzwaniem dla projektantów. Dążenie do zapewnienia inwestorowi możliwie jak największej powierzchni użytkowej, w ograniczonej przestrzeni miejskiej zlokalizowanej z reguły na bardzo drogiej działce budowlanej, mogło być najlepszym ekonomicznym uzasadnieniem budownictwa wysokiego pod koniec XIX i początkach XX wieku. Oprócz funkcji użytkowych obiekty wysokie pełnią także najczęściej rolę architektonicznej manifestacji potęgi finansowej i pozycji społeczno-politycznej inwestorów, a wspomniana determinanta wydaje się dominować w zrealizowanych lub projektowanych obecnie budynkach bardzo wysokich. Wybudowanie budynków wysokich wymaga rozwiązania wielu nowych i skomplikowanych zagadnień projektowych, zastosowania nowych metod obliczeniowych, materiałów budowlanych czy też technologii związanej z wykonywaniem elementów konstrukcyjnych dla całego obiektu. Bardzo wysokie koszty zastosowania nowych opracowań wraz z wdrożeniem ich w budynku wysokim są akceptowane przez inwestorów ze względów głównie prestiżowych. Walory obiektu wysokościowego należy zatem często oceniać w kategoriach nieuwzględnianych w tradycyjnym rachunku ekonomicznym.

Ewolucja form obiektów wysokościowych, takich jak wieże widokowe lub telewizyjne, wymaga odrębnej analizy, jaka zostanie przedstawiona w końcowej części pracy. Wyniki analizy będą jedynie dodatkowym uzupełnieniem podstawowych zagadnień podjętych w niniejszej dysertacji, zachodzących pomiędzy systemami konstrukcyjnymi a formą architektoniczną współczesnych budynku.

**Podstawowym celem niniejszej dysertacji jest próba zdefiniowania czynników mających decydujący wpływ na wybór właściwej postaci systemu konstrukcyjnego warunkującego realizację indywidualnej formy architektonicznej współczesnego budynku wysokiego.**

Pozyskane wnioski będą rezultatem kompleksowych analiz uwzględniających zmieniające się w czasie ostatniego półwiecza relacje ekonomiczne, wymogi funkcjonalne związane nade wszystko z bezpiecznym użytkowaniem budynków wysokich, pojawieniem się nowych materiałów i systemów konstrukcyjnych oraz zastosowaniem nowatorskich metod projektowych opracowanych m.in. dla potrzeb realizacji współczesnych wieżowców.

W pracy przeprowadzono wiele szczegółowych analiz mających na celu usystematyzowanie zagadnień związanych z kształtowaniem współczesnych budynków wysokich poprzez zdefiniowanie ewolucji systemów konstrukcyjnych i zmieniających się równolegle form architektonicznych. Praca zawiera opis wraz z określeniem uwarunkowań kształtowania postaci budynków wysokich w wyniku analizy zachodzących związków pomiędzy formą architektoniczną, a rodzajem systemu konstrukcyjnego obiektu, wpływu sił zewnętrznych ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień aerodynamicznych, uwarunkowań technicznych i technologicznych. Istniejące materiały źródłowe często odnoszą się w swoim zakresie tematycznym do bardzo wąskiej dziedziny wiedzy, stąd też wynika potrzeba usystematyzowania zagadnień w sposób bardziej syntetyczny i spójny w jednym opracowaniu. Zaprezentowanie w pracy głównych założeń oraz wytycznych z każdej znaczącej dziedziny technicznej pozwoli na wyjaśnienie skomplikowanych procesów zachodzących w projektowaniu i realizacji współczesnych form budynków wysokich.

Dodatkowym celem pracy, które uzupełni stan wiedzy i pozwoli na stworzenie kompleksowego opracowania, będzie próba określenia przewidywanych tendencji w ewolucji systemów konstrukcyjnych i form budynku wysokiego. Zdefiniowanie najnowszych trendów w projektowaniu wieżowców pozwoli na lepsze zrozumienie zachodzących procesów w technologii materiałowej oraz struktur przestrzennych związanych z pojęciem „budownictwa zrównoważonego”.

Zakres opracowania obejmuje analizę uwarunkowań merytorycznych, które dotyczą ewolucji i kształtowania systemów konstrukcyjnych mających istotny wpływ na rozwój formy architektonicznej budynku wysokiego. Dokładnej analizie wielokryterialnej zostanie poddana bryła obiektu odnosząca się do kształtu i formy elewacji, możliwości kształtowania budynku w istniejącej zabudowie historycznej

lub konieczności projektowania w całkowicie nowej tkance miejskiej, zakładającej jedynie zabudowę wysoką. W pracy przedstawiono reprezentatywne grupy obiektów modelowo opisujących zachodzące relacje pomiędzy systemami konstrukcyjnymi, a formą architektoniczną budynków wysokich. Dokładną analizę przeprowadzono również dla obiektów nietypowych, które powstały w wyniku modyfikacji kilku podstawowych rodzajów rozwiązań architektoniczno-konstrukcyjnych istniejących od wielu lat. Dogłębna analiza merytoryczna opracowania obejmuje również obiekty, które negatywnie wpisują się w kontekst bezpośredniego otoczenia lub zastosowania w tych obiektach rozwiązań, które należy uznać za kłopotliwe lub błędne.

W końcowej części pracy zostaną zebrane dodatkowe opisy wieżowców, które to obiekty według autora dysertacji są znaczącymi realizacjami, często wybitnych architektów i konstruktorów, stanowiące wartościowe uzupełnienie dla postawionych tez w niniejszej dysertacji. Kryterium doboru wybranej grupy obiektów wysokich nie będzie jedyne, co może sugerować nazwa obiektu wysokiego, czyli jego względna wysokość nad terenem, ale również uznanie budynku za taki, który wywarł znaczący wpływ na architekturę światową, uzyskując np.: wysokie oceny pozytywne lub negatywne środowiska projektantów architektury i konstrukcji lub znacząco wpływa na ewolucję systemów konstrukcyjnych i form architektonicznych.

Zakres pracy dotyczący ram czasowych realizacji budynków wysokich szczególnie odnosi się do przedziału od momentu budowy pierwszych budynków o konstrukcji ramowej wykonanej ze stali i/lub żeliwa, powstałych w Chicago po wielkim pożarze miasta w 1871 roku do obiektów realizowanych współcześnie do końca 2018 roku. **Szczegółowa analiza zostanie przeprowadzona dla wybranej grupy obiektów współczesnych, które zostały ukończone pomiędzy 1990 rokiem, a końcem 2018 roku.** W pracy przedstawiono również budowle z czasów antycznych, których forma oraz geometria nie straciły na znaczeniu i w obecnie realizowanych obiektach można znaleźć do nich odpowiednie podobieństwa.

Dynamiczny rozwój budownictwa wysokiego jest procesem lub zjawiskiem o zasięgu światowym często wpisującym się w pojęcie „globalności”. W związku z powyższym w pracy omówiono wybrane, a zarazem najciekawsze obiekty z całego świata, nie ograniczając się z przedstawioną w pracy analizą do jednego wybranego

ośrodka geograficznego. Podjęta tematyka pracy w odniesieniu do **architektury polskiej zostanie celowo ograniczona**. Decyzja analityczna była podyktowana występowaniem zazwyczaj w Polsce obiektów nieprzekraczających wysokości 250 - 300 metrów, co spowodowałoby znaczne ograniczenie metody badawczej opartej na analizie porównawczej i syntezie uzyskanych wyników, w odniesieniu do postawionych tez dysertacji. Budynki wysokie w Polsce są bardzo często opisywane w wielu opracowaniach naukowych, co również przyczyniło się do decyzji o celowym pominięciu opisu tych przykładów w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Polskie realizacje zostaną ujęte w grupie geograficznej opisanej w dalszym podrozdziale nazwanym w niniejszej pracy, jako „Europa i Rosja”.

W pracy podjęto próbę rozszerzenia zakresu dotychczas przeprowadzonych badań opisanych w literaturze polskiej i angielskojęzycznej, które wymagają bieżącej aktualizacji ze względu na wpływ czasu i dynamikę powstawania budynków wysokich na świecie.

## **1.6. Tezy pracy**

Schemat statyczny wolnostojącego budynku wysokiego jest najczęściej opisywany jako pionowo usytuowany wspornik zamocowany w sposób sztywny w jego podstawie, będącej fundamentem. Realizacja struktury nośnej obiektu, o takim schemacie statycznym jest uwarunkowana podstawowymi zasadami teorii konstrukcji, których prawidłowe spełnienie umożliwia bezpieczne przyjmowanie dużych wartości sił pionowych oraz poziomych mających decydujące znaczenie w projektowaniu ustroju nośnego budynku wysokiego. Siły, które mogą działać w dowolnym kierunku i są spowodowane wieloma różnymi kombinacjami obliczeniowymi, muszą być w sposób bezpieczny przejęte przez ekonomicznie i funkcjonalnie ukształtowany system konstrukcyjny kondygnacji nadziemnych oraz podziemnych. Bezpieczny sposób przekazania obciążeń na fundament oraz jego kształt geometryczny, musi zapewnić stabilność całej budowli nawet w sytuacjach wyjątkowych spowodowanych np. wpływami sił sejsmicznych lub ponad normatywną wartością występujących sił wiatru. Na wybór kształtu budynku oraz postaci jego systemu konstrukcyjnego może wpływać wiele różnych uwarunkowań związanych np. z ukształtowaniem otaczającego terenu, stosunkami



własnościowymi przestrzeni sąsiadującej z działką lub bezpośrednio się nad nią znajdującą. Coraz bardziej rygorystyczne wymagania dotyczące względnej wielkości maksymalnego odchylenia od pionu szczytu budynku mają dominujący wpływ na wybór ogólnej formy geometrycznej oraz parametrów technicznych systemu konstrukcyjnego obecnie projektowanych i wznoszonych budynków wysokich. W pracy przyjęto dwie tezy badawcze, których założenia zostaną potwierdzone lub zanegowane stosownymi analizami w niniejszej dysertacji.

## **TEZA I**

Postać głównego systemu nośnego budynku wysokiego jest w sposób szczególnie zdeterminowana wymogami podstawowych reguł teorii konstrukcji, co jednak nie ogranicza swobody twórczej. Umiejętne stosowanie tych reguł umożliwia nadanie projektowanemu obiektowi indywidualnej i unikatowej formy architektonicznej mogącej uzyskać wyjątkowe walory estetyczne.

## **TEZA II**

Budynki o bardzo dużej wysokości oraz znacznej smukłości, mające schemat statyczny w postaci pionowo usytuowanego wspornika, przyjmują często formy zbliżone do stosownych brył ostrosłupowych, co ułatwia zaprojektowanie ekonomicznych postaci systemów konstrukcyjnych umożliwiających spełnienie rygorystycznych wymogów funkcjonalnych, użytkowych oraz statyczno-wytrzymałościowych.

### **1.7. Określenie metody badawczej**

Podstawowa metoda badawcza wykorzystana w przeprowadzonej dysertacji obejmuje wyodrębnienie grupy obiektów wysokościowych, w której znacząco uwidoczniły się ciekawe relacje zachodzące między formą architektoniczną, a systemami konstrukcyjnymi. Zebrany materiał źródłowy pozwoli na sporządzenie systematyki oraz w kolejnej fazie analiz porównawczych wskazanie głównych determinant budynku wysokiego. Wyodrębnienie typowych oraz niekonwencjonalnych systemów konstrukcyjnych na podstawie analizy zebranego

materiału posłuży dodatkowo do wyłonienia wcześniej niespotykanych form architektonicznych. Dodatkowym narzędziem metody badawczej jest wyznaczenie możliwie największej liczby rygorystycznych warunków brzegowych analizy porównawczej całego obszaru badań, jakim są uwarunkowania podane w rozdziale numer 3 niniejszego opracowania.

Wnioski uzyskane z analizy porównawczej wraz z przeprowadzonymi własnymi badaniami literaturowymi, pozwolą na sformułowanie zaleceń końcowych w odniesieniu do postawionych tez na samym początku dysertacji.

Prowadzone badania analityczne oparto na tekstach źródłowych fachowej literatury polsko i angielskojęzycznej, branżowych stronach internetowych oraz własnego przeglądu rozwiązań technicznych i technologicznych stosowanych w budynkach wysokich.

Przedstawione w pracy metody badawcze oraz rezultaty uzyskane w wyniku przeprowadzonej syntezy przeanalizowanych danych mogą stanowić dodatkową pomoc praktyczną w projektowaniu budynków wysokich z zachowaniem prawidłowych relacji pomiędzy systemem konstrukcyjnym, a formą architektoniczną. Pozyskana wiedza dotycząca założeń projektowych, wraz ze stosownym doborem ustroju nośnego budynków ekstremalnych, może pozwolić projektantom branży architektonicznej oraz konstrukcyjnej na przeniesienie z korzyścią dobrych wzorców na budynki niższe tworząc obiekty ikoniczne rozpoznawane na całym świecie.

## **2. Zarys rozwoju historycznego budynków wysokich**

### **2.1. Rola i funkcja obiektów wysokich w przestrzeni architektonicznej dawniej oraz obecnie**

Historia budownictwa wysokiego rozpoczęła się jeszcze w czasach starożytnych. Analizę syntetyczno-porównawczą opisującą proces powstawania obiektów wysokich takich jak budynki, wieże, obeliski lub też pomniki, zgodnie z przeprowadzonymi badaniami należy podzielić na trzy główne okresy czasowe.

Pierwszy okres powstawania obiektów wysokich należy wyodrębnić od czasów antycznych do drugiej połowy XIX wieku, ze szczególnym wyznaczeniem

daty progowej w roku 1871, w którym miała miejsce wielka katastrofa budowlana związana z pożarem 17 tysięcy budynków znajdujących się na obszarze 6 km kwadratowych w Chicago w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej. Drugi okres czasowy należy wyodrębnić pomiędzy wprowadzonymi zmianami architektonicznymi, konstrukcyjnymi, technicznymi oraz technologicznymi wznoszenia budynków wysokich, które nastąpiły po wielkim pożarze budynków w Chicago oraz kolejnym etapem rewolucji przemysłowej w drugiej połowie XX wieku, kiedy następują znaczące przemiany społeczne, polityczne, gospodarcze i kulturowe w procesie tworzenia budynków wertykalnych. Ostatnim okresem wyróżnionym w tej analizie porównawczej to okres pomiędzy końcem XX wieku, przypadającym umownie na jego ostatnie dekady, kiedy budynkom wysokim przypisuje się szczególnie szerokie spektrum cech i atrybutów prestiżu inwestorów, miast oraz regionów geograficznych, do czasów obecnych tj. końca 2018 roku. Wydzielony ostatni okres czasowy jest związany z najbardziej dynamiczną ewolucją form architektonicznych oraz odpowiadających im strukturalnych determinant budynków wysokich. Z tego też powodu do szczegółowej analizy syntetyczno-porównawczej przedstawionej w niniejszej dysertacji zostały wybrane wspomniane ramy czasowe pomiędzy końcem XX wieku, a rokiem 2018.

Budynki wieżowe oraz obiekty wysokościowe w każdym z tych trzech wyodrębnionych okresów czasu charakteryzują się odmiennymi cechami projektowymi związanymi z przypisywaną im rolą oraz funkcją. Na przykładach reprezentatywnych przedstawiono tło historyczne powstawania budynków wysokich, co pozwala lepiej zrozumieć uwarunkowania procesów realizacji współczesnych wieżowców. Budynki wysokie to nie tylko zindywidualizowana forma architektoniczna, ale również idea scalenia obiektu z tkanką miejską, odpowiadająca danemu okresowi i miejscu.

Przyjęta metoda badawcza zgodna z wymogami podanymi w pracy [47] zakłada dogłębną analizę wielokryterialną, co pozwala zrozumieć wzajemne relacje formy architektonicznej i systemów konstrukcyjnych budynków wysokich. Symbolika budynków wysokich w każdym okresie ich powstawania i funkcjonowania była w określonych ramach czasowych podobna, choć intensywności wyodrębnionych funkcji obiektów znacząco się zmieniały. W okresie

starożytnym obiektom wysokościowym przypisywano szczególną rolę symboliczną, często zbliżoną do znaczenia mistycznego. Rozwój techniki oraz ewolucja umiejętności ludzkich pozwoliły na przypisywanie nowych lub odmiennych ról wieżowcom.

Przeprowadzone badania literatury oraz dokumentów archiwalnych umożliwiło wyodrębnienie następujących podstawowych funkcji budynków wysokich w czasach starożytnych, jako:

- funkcje mieszkalne
- funkcje obronne (wieże wartownicze i fortyfikacyjne)
- funkcje sakralne.

Współczesne budynki wysokie w znacznej mierze aplikowały dawne funkcje obiektów wysokich do swoich aktualnych potrzeb. W ostatnich dekadach nastąpiło znaczące rozwinięcie dawnych funkcji mieszkalnych na hotelowe, biurowe, rekreacyjne, handlowe lub inne tzw. mieszane. W obecnych realizacjach trudno się doszukać projektowania budynków wysokich dla celów obronnych, przynajmniej w obiektach, które są objęte analizą porównawczą w niniejszej dysertacji.

## **2.2. Zarys przeglądu znaczących obiektów wysokich od czasów antycznych do połowy XIX wieku**

Pragnieniem człowieka od zarania czasów było dążenie do choćby symbolicznego dotknięcia nieba. Ludzkie ambicje związane z budową obiektów "ikonicznych", które w różnych okresach czasowych były uznawane za utopijne lub niedorzeczne, doczekały się później realizacji.

Początek historii współczesnych wieżowców wielu badaczy lokuje we wczesnych etapach rewolucji przemysłowej, dzięki której możliwości techniczne i technologiczne pozwoliły realizować obiekty o śmiałych wizjach architektonicznych oraz optymalniejszych systemach konstrukcyjnych. Na kartach historii możemy odnaleźć liczne przykłady obiektów wysokościowych, które przeszły do historii architektury, jako ikony budownictwa.

Jedynym z kluczowych zagadnień objętych analizą jest zdefiniowanie pojęcia wraz z niezbędnymi warunkami brzegowymi określającymi czy dany

budynek wysoki można uznać za ikoniczny. W pracy celowo starano się unikać uogólnień analitycznych związanych jedynie z wysokością względną budynku, starając się przedstawić dodatkowy zakres stosowania determinant form architektonicznych odpowiadających różnym okresom czasowym powstawania obiektów. Budynki wysokie, to nie tylko najwyższe wieżowce Chicago, Nowego Jorku czy Dubaju, to również obiekty nieco niższe zrealizowane na całym świecie.

Współcześni badacze architektury odnajdą w czasach antycznych pojęcie budowli nazywanej *zikkuratem* występującej na terenach ówczesnej Mezopotamii. Konstrukcja *zikkuratu* opierała się na wewnętrznym rdzeniu wznoszonym z cegły podobnie, jak w wielu współcześnie stosowanych systemach konstrukcyjnych oraz układzie schodowym ścian cofniętych na kolejno następujących po sobie poziomach tarasowych. Oprócz funkcji sakralnej, w *zikkuratach* lokowano również skarbcce, magazyny, szkoły i biblioteki [39]. Dotychczas udało się odnaleźć, w wyniku prac archeologicznych kilkanaście tego typu obiektów. Przykładem reprezentatywnej formy architektonicznej *zikkuratu* jest częściowo zrekonstruowany obiekt w mieście Ur (dziś Al-Muqaiyar w Iraku), który przedstawia (Rys. 2.2.1).



Rys. 2.2.1 Zikkurat w mieście Ur (dzisiejszy Al-Muqaiyar w Iraku)  
Autor zdjęcia: Michael Lubinski

W ocenie badaczy *zikkuraty* mogły być pierwowzorem wieży Babel (Rys. 2.2.2), która według archeologów i dostępnych źródeł miała wysokość około 100 metrów. Dokładnej wysokości wieży Babel nie sposób podać, istotniejszym w przedstawionym przykładzie jest jej symbolika, która nieodzownie związana jest z

określoną rolą i funkcją obiektu wysokościowego. Posłużenie się w niniejszej dysertacji przykładem wieży Babel ma ukazać jedynie znaczenie wielu dodatkowych cech budynków wysokich bez zawężania pojmowania obiektu w kategorii jednowymiarowej, jaką jest podawana przez wielu badaczy tematyki wysokościowców sama wysokość względna nad terenem.



Rys. 2.2.2 Mała Wieża Babel - obraz Pietera Bruegla starszego<sup>3</sup>

Obiektom wysokim przypisywano w starożytności często pewne atrybuty symboliczne dzięki którym zaliczano je do antycznych cudów świata. Najlepiej oddają to zachowane do dziś wielkie piramidy egipskie Cheopsa, Cheferna i Mykerinosa. Budowle będące miejscem wiecznego spoczynku władców Egiptu mają wysokość: 147 metrów piramida Cheopsa, 144 metrów piramida Cheferna oraz 65 metrów piramida Mykerinosa. Ich funkcja, jako grobowców faraonów jest powszechnie akceptowana, a przyjęty system konstrukcyjny odpowiadający układom ścianowym wraz z odzwierciedloną formą piramidalną (Rys. 2.2.3) będzie miał odniesienie we współczesnych budynkach wysokich. Najwyższy obecnie obiekt na świecie o nazwie Burj Khalifa w Dubaju o wysokości 828 metrów zrealizowany w 2010 roku przyjmuje klasyczną formę piramidalną, przy zastosowaniu systemu konstrukcyjnego ścianowego i wewnętrznego rdzenia umiejscowionego centralnie wykonanego we współczesnym materiale, jakim jest żelbet.

<sup>3</sup> Obraz olejny przedstawiający wieżę Babel wykonany w 1563r, obecnie znajduje się w Muzeum Boijmans Van Beuningen w Rotterdamie



Rys. 2.2.3 Kompleks piramid w Gizie

Źródło: [i8]

Cechy sakralne budynków wysokich odnajdujemy również na gruncie rodzimym, jakim jest Europa. Najwyższymi takimi obiektami w czasach historycznych są katedry chrześcijańskie, których szpiczaste zakończenie dachów lub wież dzwonnicy miało symbolizować potęgę boską i słabość ludzką wraz z uduchowionym dążeniem do nieba. Reprezentatywnymi dominantami wysokościowymi w przestrzeni architektonicznej miast, które przetrwały do czasów współczesnych, a zarazem są obiektami ikonicznymi na skalę nie tylko Europejską, ale i świata cywilizowanego to: 162 metrowa Katedra w Ulm (Rys. 2.2.4 a), Katedra w Kolonii ze 158 metrowymi bliźniaczymi wieżami (Rys. 2.2.4 b), oraz 137 metrowa Katedra św. Szczepana w Wiedniu (Rys. 2.2.4 c).



Rys. 2.2.4 a  
Katedra w Ulm



Rys. 2.2.4 b  
Katedra w Kolonii



Rys. 2.2.4 c  
Katedra św. Szczepana

Budowle wysokie, w omawianym okresie miały również inne funkcje wpisujące się w tradycje świeckie, wśród nich przykładem reprezentatywnym jest miasto Shibam składające się z 500 glinianych wieżowców [39], wiele których jest szacowany na od 400 do 500 lat. Budynki znajdujące się w stolicy Jemenu Sanie, miały w przeważającej części funkcję mieszkalną, składającą się z obiektów wielokondygnacyjnych, których niektóre miały nawet 8 poziomów użytkowych. Schemat rozplanowania obiektów w przestrzeni architektoniczno-urbanistycznej narzucił powstanie szeregu wzajemnie prostopadłych uliczek. Miasto wraz z powstałym układem urbanistycznym często określane jest "Manhattanem pustyni" [39]. Miasto Shibam (Rys. 2.2.5 a i b) składające się na zespół budynków wysokich zostało wpisane w roku 1982 na listę światowego dziedzictwa UNESCO potwierdzając, że architektura wertykalna budynków może być wartością ponadczasową.



Rys. 2.2.5 a i b (a) - widok panoramy miasta Shibam w Jemenie  
(b) – budynki miasta Shibam

Źródło: [i34]

Powracając z analizą historyczną na tereny dzisiejszej Europy, można przedstawić wiele interesujących przykładów realizacji obiektów wysokich związanych z tradycją świecką. Wśród nich należy wymienić XVI wieczne kamienice w Edynburgu [39] lub włoskie wieże mieszkalne. Miasta północnych i środkowych Włoch charakteryzowały się gęstą zabudową wynikającą z ograniczonej ilości miejsca w ścisłym centrum [88]. Średniowieczni architekci podobnie, jak i współcześni projektanci, musieli zmierzyć się z problemem dużej liczebności ludzkiej na stosunkowo małym obszarze opisywanym poprzez zjawisko określone potocznie „przeludnieniem”.



Zarówno wtedy, jak i dziś racjonalnym rozwiązaniem była budowa miast wertykalnych, które były jedynym akceptowalnym w tych warunkach rozwiązaniem problemu społeczno-urbanistycznego miasta. Do najslawniejszych wież mieszkalnych, które przetrwały w niezmienniej formie architektonicznej [88], należą bezspornie dwa obiekty w Bolonii oraz wieże w San Gimignano. Szacuje się, że w okresie dynamicznego rozwoju Bolonii mogło być nawet 100 podobnych obiektów [88] (Rys. 2.2.6). Te reprezentatywne budynki wysokie, były i wciąż są symbolem miasta. Wieża Torre Asinelli o wysokości 97 metrów oraz Torre Garisenda o wysokości 47 metrów zostały wykonane w całości jako układy ścianowe kamienne (Rys. 2.2.7 a i b). W wyniku powstałych uszkodzeń konstrukcyjnych, w okresie późniejszym ich tradycyjne konstrukcje murowe zostały wzmocnione poprzez dodanie elementów stalowych – ściąągów, aby zapewnić wymaganą przestrzenną stateczność budynkowi.



Rys. 2.2.6 Wieże mieszkalne w przestrzeni architektonicznej Bolonii w XIII i XIV wieku

Źródło: [i31]



a)



b)

Rys. 2.2.7 a i b (a) Wieża Torre Asinelli oraz (b) Torre Garisenda

Źródło: [i31]

Jednymi, z dobrze zachowanych grup obiektów wysokich pochodzących z okresu średniowiecza są również wieże w mieście San Gimignano (Rys. 2.2.8) w Toskanii, które jest określane mianem „średniowiecznego Manhattanu”. Przydomek miasto to pozyskało za sprawą wysokich, czworokątnych wież zbudowanych z kamienia. Przekazy historyczne informowały, iż w mieście było ponad 70 takich obiektów. Do dnia dzisiejszego pozostało 14 budowli. Wieże były budowane na prywatne zlecenia bogatych mieszkańców miasta. Niezależnie od tego, iż miały charakter obronny, były symbolem wysokiej pozycji właściciela w hierarchii społecznej oraz jego bogactwa. Dwie najśłynniejsze wieże San Gimignano to Torre Rognosa, która została zbudowana w 1200 roku i posiada wysokość 51 metrów oraz Torre Grossa o wysokości 54 metrów powstała w 1311 roku, jako fragment ratusza miejskiego.



Rys. 2.2.8 Wieże w San Gimignano  
Źródło: [i41]

### **Krótkie podsumowanie:**

Z analizy przedstawionych reprezentatywnych przykładów obiektów wysokich, powstałych od czasów antycznych do połowy XIX wieku wynika, iż przypisywano im cechy symboliczne często utożsamiane z potęgą finansową, wielkością wpływów politycznych lub innym bogactwem. W omówionym okresie pełniły funkcję sakralną, świecką oraz obronną. Przedstawione zależności form

architektonicznych i systemów konstrukcyjnych wpływające na ewolucję otaczającej przestrzeni w omówionym podrozdziale zostały niezaprzeczalnie przeniesione do najwyższych budynków realizowanych w czasach współczesnych.

Klasyczne układy piramidalne wraz z aplikacją systemów ścian/tarcz nośnych realizowane są w wielu współczesnych budynkach, gdzie forma architektoniczna obiektu powinna spełnić wymagania prestiżu i symboliki bogactwa inwestora, przy uwzględnieniu podstawowych zasad teorii konstrukcji.

### **2.3. Opis ogólny systemów konstrukcyjnych oraz form architektonicznych obiektów wznoszonych od połowy XIX wieku do połowy wieku XX**

Dalszy rozwój budownictwa światowego oraz technik wznoszenia budowli umożliwia ewolucję form architektonicznych dostosowując budynki do wymagań użytkowników. W poszukiwaniu lepszego doświetlenia wnętrza i stworzenia większej przestrzeni użytkowej - przy stosunkowo niewielkiej powierzchni działki w centralnej części miasta - projektanci poszukują nowych rozwiązań technicznych. Rozwiązaniem konstrukcyjnym, które umożliwiło wznoszenie coraz wyższych budynków przy uzyskaniu dużych powierzchni użytkowych jest zastosowanie żeliwnej, a później stalowej ramy nośnej. Zanim udało się zastosować nowe rozwiązanie konstrukcyjne ramy stalowej poszukiwano równocześnie nowej formy architektonicznej budynku, która będzie pomostem pomiędzy klasyczną formą katedralną przy stosunkowo małej powierzchni użytkowej do rozwiązań, które uwzględnią poszerzoną funkcję obiektu.

Po przeanalizowaniu szeregu materiałów źródłowych uważam, iż reprezentatywnym przykładem obiektu, w którym nie zastosowano jeszcze nowatorskiego rozwiązania ramy stalowej, jako systemu konstrukcyjnego, jest obiekt o nazwie Mole Antonelliana (Rys. 2.3.1 a i b) autorstwa Alessandro Antonello w Turynie. Budynek pierwotnie powstaje na zlecenie gminy żydowskiej, jednakże w chwili ukończenia budynku w 1889 roku, kiedy jest najwyższym budynkiem [88] na świecie, jest już własnością miasta. Projekt budynku Mole, w którym połączono kondygnacje użytkowe wraz z ostrołukowym sklepieniem o geometrii kopertowej ze wzmocnieniami żebrowymi ukazuje

ogromne możliwości systemu ścianowego. Budynek posiada wysokość 168 metrów, która dla wielu współczesnych obiektów wysokich może być imponująca.

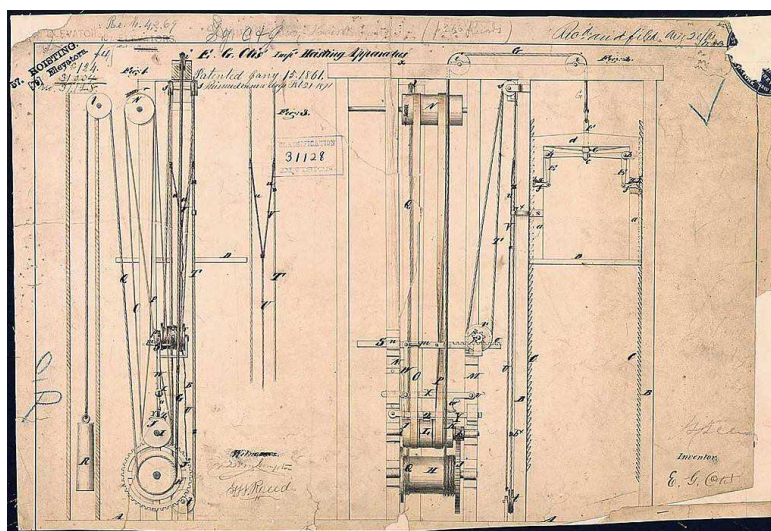
Obecnie realizowane w Europie budynki wysokie, które zaprojektowano z zastosowaniem najnowocześniejszych systemów konstrukcyjnych średnio nie przekraczają wysokości około 250 metrów, a wyjątki potwierdzają przytoczoną regułę. Wśród ukończonych niedawno budynków we Włoszech najwyższym obiektem jest Unicredit Tower wybudowany w 2012 roku o wysokości 218 metrów.



a) b)  
Rys. 2.3.1 a i b Mole Antonelliana (a), widok na panoramę miasta Turynu (b)  
Źródło: [i35]

W latach 1815 – 1870 w Europie Zachodniej oraz w Ameryce Północnej rozpoczyna się dotychczas niespotykany rozwój przemysłu i gospodarki często określanej jako okres "rewolucji przemysłowej". Związane to było z dynamicznym rozwojem technologicznym w przemyśle oraz ewolucją urządzeń do produkcji masowej. Umożliwienie przemysłowej obróbki rudy żelaza i rozpoczęcie masowej produkcji stopów stali o podwyższonych parametrach mechanicznych i fizycznych miało ogromny wpływ na realizację coraz ciekawszych projektów architektonicznych budynków wysokich. Inżynierowie Bassemer i Thomas oraz Martin opracowali metodę wytopu rudy tak, aby była mniej krucha uzyskując tym samym możliwość efektywnego walcowania stali. Rozwój technologii hutniczych przyczynia się do ewolucji systemów konstrukcyjnych, które są aplikowane do pionierskich rozwiązań budynków wysokich.

Początkowe postulaty przeciwników obiektów wysokościowych dotyczące niskiej praktyczności najwyższych kondygnacji, na które prowadziły setki stopni schodowych, zostały przełamane w 1853 roku przez amerykańskiego przedsiębiorcę i wynalazcę Elishę Otisa, który przedstawił projekt windy (Rys. 2.3.2). Jedną z pierwszych wind pasażerskich została zamontowana w Nowym Jorku w 1857 roku [53], a następnie od lat 80 XIX wieku rozpoczęto stosowanie napędów hydraulicznych i elektrycznych. Nowatorskie rozwiązanie komunikacji pionowej staje się krokiem milowym w rozwoju budownictwa wysokiego.



Rys. 2.3.2 Projekt windy Elishy Otisa  
Źródło: [i32]

Historia niemal 150 letniego rozwoju współczesnego budownictwa wysokiego rozpoczęła się tak naprawdę w skali globalnej w Chicago w 1871 roku, kiedy w ciągu jednej nocy spłonęło ponad siedemnaście tysięcy budynków [39]. Katastrofa budowlana w Chicago (Rys. 2.3.3) pozwoliła, a zarazem przyspieszyła rozwój budownictwa wysokiego. Zakaz wznoszenia budynków o konstrukcji łatwopalnej pozwolił na zastosowanie pionierskich rozwiązań ram stalowych wspomaganych ścianami, które mogły mieć podwójną funkcję, jako element nośny drugorzędny lub tylko wypełniający przestrzeń pomiędzy wspomnianymi ramami.



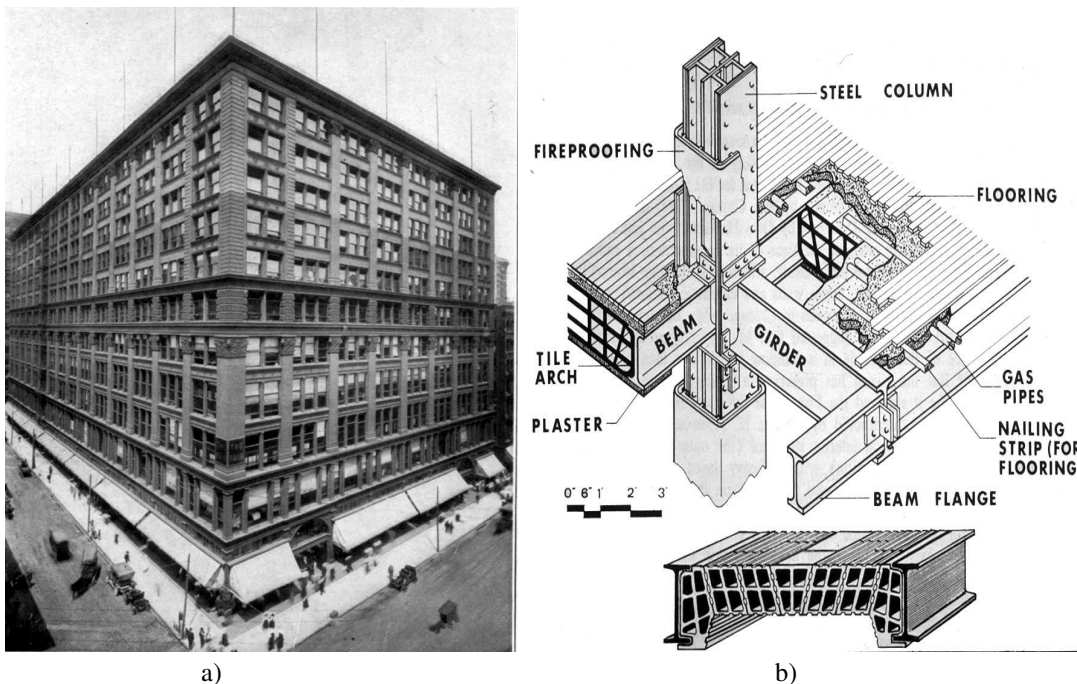
Rys. 2.3.3 Zniszczenia Chicago po wielkim pożarze  
Źródło: [i33]

Budynek o nazwie The Home Insurance Buildig (Rys. 2.3.4 a i b), który powstaje w 1885 roku, badacze historii budownictwa wysokiego określają jego jako pierwszy wieżowiec na świecie. Zaprojektowany przez założyciela „Szkoly Chicagowskiej” Williama Le Barrona Jenney`a<sup>4</sup>, budynek miał 42 metry wysokości i liczył 11 kondygnacji. Zaprojektowana konstrukcja budynku była kilkakrotnie lżejsza niż odpowiadająca jej struktura wykonana z kamienia lub wypalanej cegły. Forma budynku wynikała wprost z funkcji jaką miał spełniać, co było zgodne z założeniami architektonicznymi nurtu „Szkoly Chicagowskiej”. Wysokość The Home Insurance Buildig nie jest oszałamiająca porównując ją do wysokości obiektów, które powstawały znacznie wcześniej. Analiza historii budownictwa wysokiego w omawianym okresie czasu pozwala uznać go za wieżowiec ze względu na zastosowanie nowatorskiego rozwiązania ramy stalowej jako ustroju nośnego budynku.

Gwałtowny rozwój miasta związany z rewolucją przemysłową przyczynił się do rozbiórki The Home Insurance Buildig już w 1931 roku, aby zastąpić go większym i nowocześniejszym budynkiem.

---

<sup>4</sup> William Le Barron Jenney – Twórca tzw. „Szkoly Chicagowskiej” był z wykształcenia inżynierem Jego uczniami byli najlepsi architekci „Szkoly Chicagowskiej” tacy jak: Louis Sullivan, William Holabird, Dankmar Adler oraz Daniel Burnham



a) b)  
 Rys. 2.3.4 a i b The Home Insurance Building (a), układ ramowy stalowy budynku (b)  
 Źródło: [i1]

Koniec XIX wieku i początek XX wieku jest okresem dynamicznego powstawania budynków wysokich o stalowej konstrukcji ramowej. Nurt architektoniczny „*Szkoły Chicagowskiej*” widoczny jest w realizacjach budynków takich, jak: Sullivan Center, Auditorium Building, Fisher Building, Flarion Building, Condict Building, Reliance Buliding. Wszystkie te budynki zostają zaprojektowane i zrealizowane w modernistycznym stylu zgodnym ze założeniami „*Szkoły Chicagowskiej*”. Cechą wyróżniającą, jest podporządkowanie formy architektonicznej obiektu względem jego funkcji. Zastosowany stalowy szkielet ram nośnych, który staje się pośrednio determinantą formy budynku, wskazuje na silne relacje zachodzące pomiędzy architekturą a konstrukcją. Architektura elewacji obiektów wysokich zostaje wprost podporządkowana systemowi konstrukcyjnemu. Ten nurt projektowania budynków w omawianym okresie jest widoczny nie tylko w Chicago, jako kolebki wczesnej fazy modernistycznej formy budynków wysokich, ale również w Nowym Jorku, Los Angeles, San Francisco i wielu innych miastach Ameryki Północnej.

Nowy Jork na przełomie lat 20 i 30 XX wieku jest miastem, które chce eksponować swoją potęgę ekonomiczną wykorzystując lokowanie kolejnych

wysokościowców w swoich granicach administracyjnych. W przeciągu zaledwie jednego roku powstają ówczesne trzy najwyższe wieżowce na świecie.

Pierwszym budynkiem tworzącym kult ikoniczności budynków wysokich to Trump Building<sup>5</sup> (Rys. 2.3.5 a) o wysokości liczonej do górnego zakończenia iglicy wynoszącej 283 metry. Ukończony w 1930 roku budynek został zaprojektowany przez architekta H. Craig Severance. Drugą ikoną ówczesnego Nowego Jorku jest budynek Chryslera (Rys. 2.3.5 b) o wysokości 319 metrów wliczając wysokość obiektu wraz z iglicą, zaprojektowany przez Williama van Alen'a. Ciekawym rozwiązaniem formy architektonicznej jest wykonana 60-cio metrowa iglica stalowa ozdobiona zgeometryzowanymi ornamentami. Zastosowany detal możemy odnaleźć w wielu późniejszych realizacjach współczesnych budynków wysokich. Najważniejszą architektoniczną ikoną miasta oraz rozpoznawalnym symbolem zostaje Empire State Building w 1931 roku, ukończony w 20 miesięcy (Rys. 2.3.5 c). Budynek o wysokości 381 metrów wykonany został poprzez zastosowanie ustroju ramowego stalowego.

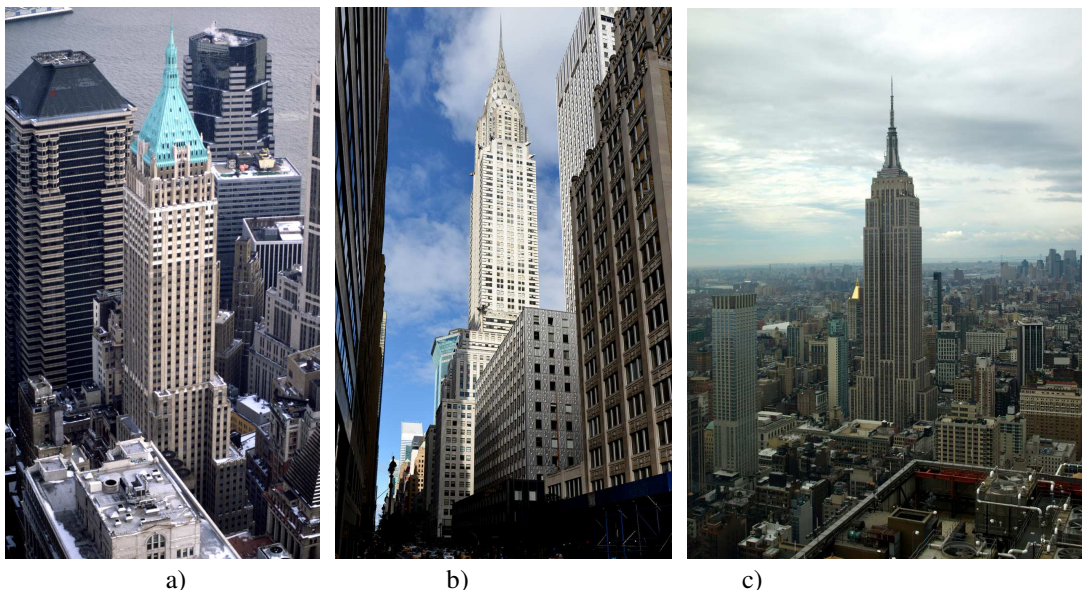
Zaprojektowany przez architektów Shreve, Lamb i Harmon'a budynek posiada formę zaakcentowaną przez pionowy podział konstrukcji ramy stalowej. W ciągu sześciu miesięcy została zmontowana konstrukcja stalowa 85 kondygnacyjnego budynku, jest to w pewnym sensie rekordem rozwiązań technologii montażu oraz rozwiązań technicznych systemu ramowego budynku wysokiego [53]. Empire State Building przez prawie 40 lat dzierżył prestiżową pozycję najwyższego budynku świata, podkreślając potęgę miasta Nowego Jorku oraz mocarstwowości Ameryki Północnej.

Czynnikiem, który umożliwił w tych dwóch ośrodkach miejskich dynamiczne lokowanie budynków wysokich jest podłoże skaliste, co w początkowej fazie rozwoju budownictwa wysokiego oraz dostępnej technice fundamentowania było bardzo ważnym uwarunkowaniem projektowym i wykonawczym.

---

<sup>5</sup> Druga oficjalna nazwa budynku Trump Building to 40 Wall Street





Rys. 2.3.5 a, b, c Ikony budownictwa wysokiego Nowego Jorku (a) - Trump Building, (b) – Chrysler Building, (c) - Empire State Building Źródło: [11]

### **Krótkie podsumowanie:**

Wieżowce zrealizowane zgodnie z ideą drapacza chmur „*Szkoły Chicagowskiej*” w omawianym okresie czasu pozwalają na uzyskanie bardzo dużej, dotąd niemożliwej wielkości powierzchni użytkowej budynku w stosunku do powierzchni działki. Flatrion Building w Nowym Jorku o wysokości 87 metrów i posiadający 21 kondygnacji nadziemnych wykonany w konstrukcji stalowej w 1902 roku, powieliła powierzchnię działki ponad dwudziestokrotnie [88] (Rys. 2.3.6 a i b). Możliwości techniczne realizacji ram stalowych, jako układu nośnego budynku stają się pierwowzorem późniejszych wieżowców z lat 60, 70 i 80 XX wieku. Zastosowanie wówczas przeszklonych fasad nadaje obiektowi lekkości pomimo mocno zgeometryzowanych form architektonicznych. Późniejsze zrealizowane obiekty oraz budynki ostatnich trzech dekad czerpią założenia zawarte w rozwiązaniach techniki przeszkleń fasad budynków.



a) b)  
Rys. 2.3.6 a i b Budynek Flatiron Building w Nowym Jorku  
Źródło: [i1]

#### 2.4. Charakterystyka ogólna podstawowych rodzajów systemów konstrukcyjnych budynków wysokich projektowanych i realizowanych od połowy XX wieku

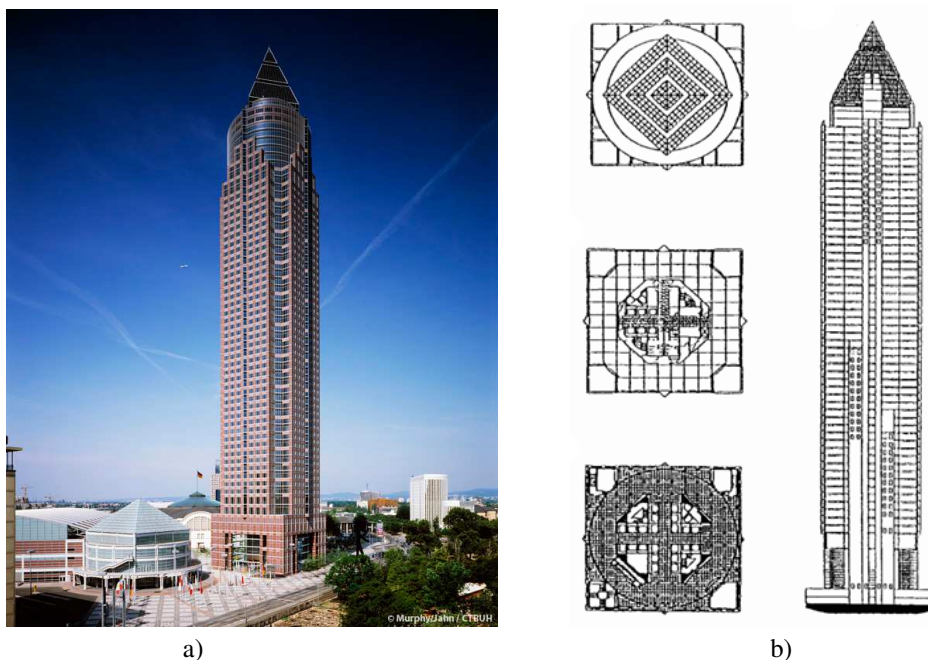
W początkowym okresie wznoszenia budynków wysokich systemy konstrukcyjne musiały odpowiadać stosownym ówczesnym standardom technicznym w procesie przenoszenia jedynie sił pionowych. Wraz z ewolucją projektowania wieżowców dotyczącą tworzenia coraz wyższych obiektów oraz mających bardzo złożone formy architektoniczne, udział sił pionowych w procesie decyzyjnym zmniejszył się na rzecz oddziaływania sił poziomych oraz sił dynamicznych powstających podczas trzęsień ziemi, definiowanych jako oddziaływania sejsmiczne. Obecne rezultaty badań podane w pracach [18,19,28,29,41,43] wykazały, iż wielkość sił poziomych pochodzących od oddziaływań wiatru zmienia się wraz z wysokością obiektu w zależności od  $1:6$  do  $1:4$ , gdzie dla "1" przyjmuje się wartość siły wiatru w dolnej części budynku, a "6" na jego wierzchołku [53].

Teorie mechaniki budowli oraz wytrzymałości materiałów budowlanych należało umiejętnie zastosować w nowych rozwiązaniach systemów konstrukcyjnych, które zapewniłyby bezpieczne przeniesienie sił poziomych na posadowienie budynku wraz z uzyskaniem odpowiedniej sztywności przestrzennej. Wymienione czynniki ograniczyłyby wychylenia wierzchołka wraz z niwelowaniem niekorzystnych zjawisk o charakterze dynamicznym działającym na wieżowiec.

Specyfika realizacji coraz wyższych budynków spowodowała poszukiwanie konstrukcji, która z jednej strony nie będzie ciężka, aby nie powodować zbyt dużych sił pionowych wynikających z ciężaru własnego oraz z drugiej strony niezbyt lekka, aby nie być podatna na drgania własne będące niekorzystnym zjawiskiem dla użytkowników. Sztywność ustroju nośnego stała się w procesie wznoszenia coraz wyższych budynków nadrzędnym kryterium w kształtowaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych.

Od połowy XX wieku, kiedy w sposób intensywny rozpoczyna się zjawisko społeczne związane z pragnieniem sięgnięcia „*coraz wyżej*”, często opisywanego jako sięgnięcia poziomu nieba przy wykorzystaniu do tego celu realizowanych budynków, konstruktorzy i architekci rozpoczęli poszukiwania coraz to nowszych rodzajów systemów konstrukcyjnych. Nowe podejście projektantów do konstrukcji wieżowca wynikało z założenia, iż przeniesienie obciążeń pionowych na grunt wraz z przeciwdziałaniem wpływu obciążeń wiatrem powinno być realizowane poprzez współpracę dwóch oddzielnych systemów konstrukcyjnych. Istniejące dotychczas rozwiązania ram stalowych zaczęto modyfikować poprzez dodawanie tężników poziomych i pionowych uzyskując większą sztywność przestrzenną budynku.

Wprowadzenie wewnętrznego, usytuowanego centralnie trzonu żelbetowego lub modyfikowanego układu, w postaci szeregu słupów stalowych było faktycznym początkiem ewolucji budynków wysokościowych. Rozwiązanie, w którym sztywny trzon przenosi w głównej mierze obciążenia poziome, a zewnętrzna rama stalowa z połączeniami przegubowymi wspomaga cały układ nośny zostało zrealizowane np. w budynku Masetrum we Frankfurcie nad Menem o wysokości 259 metrów i liczącego 63 kondygnacji nadziemnych oraz dwóch kondygnacji podziemnych (Rys. 2.4.1 a i b).



Rys. 2.4.1 a i b Budynek Masseturm we Frankfurcie nad Menem. (a) widok ogólny budynku  
 Źródło: [i1], (b) przekrój pionowy wraz z charakterystycznymi rzutami  
 Źródło: [53]

Kolejnym etapem w rozwoju systemów konstrukcyjnych było przeniesienie stężeń stalowych z wnętrza budynku na jego elewację. Przeprowadzony zabieg techniczny posiadał podwójną korzyść, zwiększał sztywność przestrzenną wieżowca oraz stanowił uzupełnienie formy architektonicznej budynku, jako elementu estetycznego. Przedmiotowy system konstrukcyjny nazwano układem powłokowym. Cechami nadrzędnymi tego rozwiązania było zastosowanie skartowań pól zewnętrznych elewacji, wykonanie sztywnych połączeń słupów wraz z ich zagęszczeniem na fasadzie wieżowca. Zewnętrzna powłoka budynku przejmowała w sposób dominujący obciążenia zewnętrzne, a trzon żelbetowy był w znacznej mierze odciążony.

Systemy powłokowe zastosowano w realizacjach, takich budynków jak: John Hancock Center (Rys. 2.4.2 a) w Chicago o wysokości 343 metrów lub nieistniejące bliźniacze wieże World Trade Center (Rys. 2.4.2 b) w Nowym Jorku o wysokości 415 metrów i 417 metrów. Stosowanie przedmiotowych rozwiązań konstrukcyjnych będących strukturalną determinantą formy architektonicznej przyczyniło się do powstania obiektów, które stały się w późniejszych latach ikonami budownictwa wysokościowego.



a)

b)

Rys. 2.4.2 a i b John Hancock Center (a) World Trade Center (b)

Źródło: [i1]

Rozwinięciem idei systemów powłokowych i dwupowłokowych, których autorstwo należy przypisać wybitnemu konstruktorowi Fazlurowi Kahnowi jest system megastruktur. Ustrój nośny składa się z połączonych bloków modularnych, często określanymi pojęciem "*rur*" i jest wykonany w formie zagęszczonych siatek składających się z stalowych słupów i poziomych rygli. W układzie megastruktur nie występuje wewnętrzny trzon żelbetowy jako integralny składnik systemu nośnego.

Modelowym przykładem jest budynek Sears Tower / Willis Tower (Rys. 2.4.3 a i b) w Chicago o wysokości 442 metrów autorstwa Fazlura Kahna.



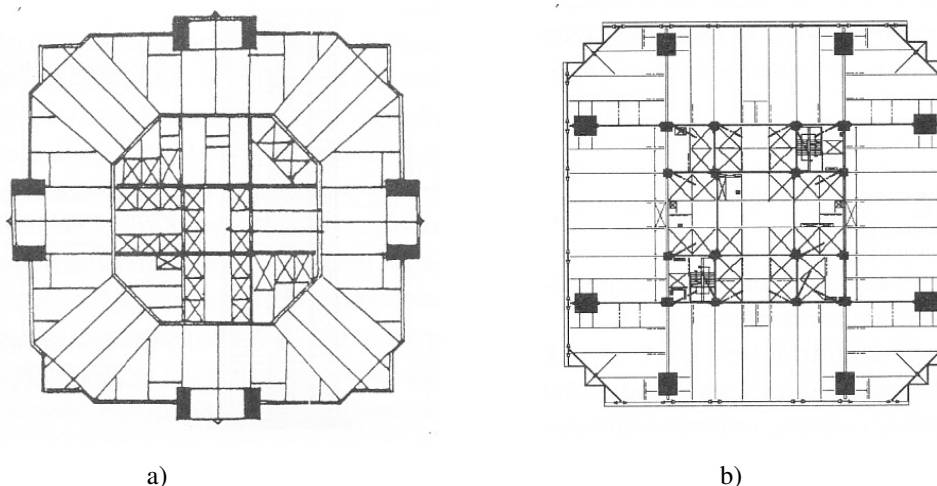
a)

b)

Rys. 2.4.3 a i b Budynek Sears Tower. Obecna nazwa to Willis Tower

Źródło [i1]

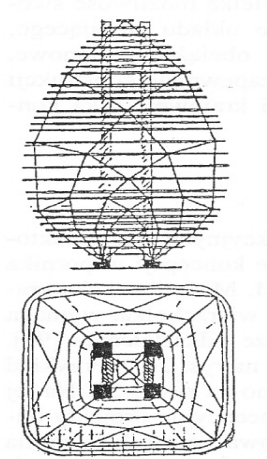
Do końca XX wieku rozwój podobnych systemów konstrukcyjnych był procesem niezakończonym, gdyż dla budynków najwyższych inżynierowie z biura Thornton Tomasetti zaproponowali całkowicie nowy układ nośny, jakim był układ megakolumn, które umieszczono po obrysie zewnętrznym budynku. Odmienne do poprzednich rozwiązań konstrukcyjnych systemów powłokowych powrócono tu do masywnego trzonu żelbetowego. Zaproponowane megakolumny to skrzynie stalowe wypełnione betonem wraz ze zbrojeniem, które połączono w sposób sztywny ze wspomnianym trzonem żelbetowym. System megakolumn stosowany jest najczęściej dla najwyższych budynków wieżowych o wysokości powyżej 400 metrów [53]. Cechą charakterystyczną tego ustroju konstrukcyjnego są dominujące elementy żelbetowe w całym budynku, które zostały „oderwane” od formy architektonicznej elewacji. Wśród istniejących modyfikacji systemu megakolumn można wyodrębnić: klasyczny schemat o prostych wolnostojących słupach oraz układ ze skartowaniami. Reprezentatywnymi przykładami aplikacji systemu megakolumn w budynkach, które przeszły do historii budownictwa wysokiego oraz stały się ikonami architektury, są: Jin Mao Building (Rys. 2.4.4 a) w Szanghaju w Chinach o wysokości 421 metrów i mający 88 kondygnacji oraz budynek Taipei 101 (Rys. 2.4.4 b) na Tajwanie o wysokości liczonej wraz z iglicą 509 metrów i posiadający 101 kondygnacji nadziemnych oraz 5 kondygnacji podziemnych.



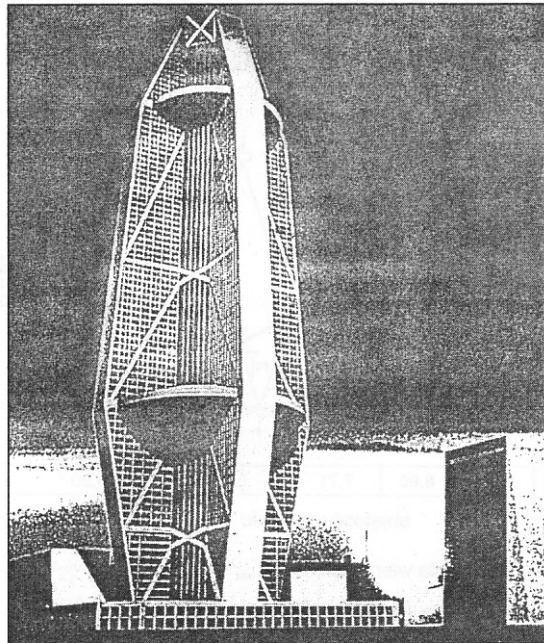
Rys. 2.4.4 a i b Rzuty kondygnacji powtarzalnych budynków: (a) Jin Mao Building, (b) Taipei 101  
Źródło: [53]

Dynamika zmian zachodzących w ewolucji form architektonicznych budynków wysokich jest procesem nieskończonym wynikającym z coraz śmielszych wizji projektantów wieżowców. Wiele materiałów w dostępnej literaturze opisuje powstanie systemów odmiennych od standardowych, jako modyfikacji już istniejących ustrojów lub zaprojektowanie hybrydy wynikającej z połączenia rozwiązań konstrukcyjnych różnych układów nośnych. Na podstawie przeprowadzonych własnych badań i analiz materiałów źródłowych stwierdzam, iż modyfikacje istniejących standardowych systemów konstrukcyjnych budynków wysokich nie można uznać za rozwiązania niekonwencjonalne, a jedynie indywidualne dopasowanie ustroju do projektowanego obiektu.

Do reprezentatywnych przykładów nigdzie dotychczas niesklasyfikowanych, którym należy przypisać pojęcie systemów niekonwencjonalnych, to formy konstrukcyjne i architektoniczne bazujące na koncepcji wspornika kratowego. Projekty teoretyczne budynków wysokich o nazwie „tulipanowce” zostały opracowane przez wybitnych polskich profesorów: Wacława Zalewskiego i Wojciecha Zabłockiego. Konstrukcja przypominająca formę architektoniczną wachlarza, umieszczona przy zewnętrznych ścianach obiektu, przejmuje obciążenie poziome oraz znaczną część oddziaływań pionowych. Dodatkowym założeniem konstrukcyjnym jest scalenie ścian zewnętrznych poprzez główne stropy rozmieszczone, w rozstawie co 10-12 metrów, do których możliwe jest podwieszenie stropów pośrednich [12]. Zastosowanie konfiguracji wspornika kratownicy tzw. bulwiastego, wywodzącej się z teoretycznego modelu tzw. belki Michell'a, pozwala na ograniczenie wielkości odkształceń występujących w wieżowcach. Zaproponowane obiekty z uwzględnieniem konstrukcji kratownicy Michell'a w budynkach „tulipanowych” posiadają oryginalne i innowacyjne formy architektoniczne (Rys. 2.4.5 oraz Rys. 2.4.6).



Rys. 2.4.5 Koncepcja budynku wykorzystująca teorię zasady pracy wspornika Michell'a  
Źródło: [12, 92,93]



Rys. 2.4.6 Koncepcja wieżowca o wachlarzowej konstrukcji  
Źródło: [12, 92,93]

### Krótkie podsumowanie:

Przedstawiona ogólna charakterystyka systemów konstrukcyjnych wykazała, iż dynamiczna ewolucja form architektonicznych budynków wysokościowych, współzależna z rozwojem systemów konstrukcyjnych, nastąpiła od drugiej połowy XX wieku i trwa do dnia dzisiejszego. Największe osiągnięcia w dziedzinie architektury i konstrukcji wieżowców wystąpiły w okresie ostatnich 70 lat. Układy **płaskie** reprezentowane przez systemy ramowe, kratowe lub tarczowe oraz



rozwiązania **przestrzenne** budynków w postaci systemów trzonowych, powłokowych, megakonstrukcji i megakolumn mają liczne odmiany techniczne wynikające, z indywidualnych zmian wprowadzonych do schematów konstrukcyjnych względem rozwiązań początkowych. Rozwój systemów konstrukcyjnych wieżowców został spowodowany dwoma głównymi uwarunkowaniami. Pierwszym, z nich jest dążenie do projektowania obiektów coraz wyższych, w których system konstrukcyjny musi przejmować w sposób bezpieczny zwiększone oddziaływania pionowe związane z ciężarem własnym oraz poziome pochodzące od wiatru, w tym również i dynamiczne związane z wpływem czynników sejsmicznych. Drugim uwarunkowaniem jest projektowanie obiektów o oryginalnych i o unikatowych formach architektonicznych, których osiągnięcie jest jednym z głównych wymagań stawianych przez inwestora. Wymienione tendencje projektowe związane z realizacją coraz wyższych budynków wraz z zastosowaniem skomplikowanych form architektonicznych umożliwiają współczesne materiały konstrukcyjne o wysokich parametrach wytrzymałościowych oraz nowoczesne technologie prowadzenia skomplikowanej budowy [11].

Szczegółowa analiza opisanych powyżej głównych systemów konstrukcyjnych budynków wysokich jest omówiona w rozdziale nr 4.

## **2.5. Obecne tendencje obserwowane w procesach projektowania budynków – zarys ogólny**

W obecnym świecie, a w szczególności w ostatnim półwieczu, nie brakuje nowatorskich oraz dotychczas niespotykanych form budynków wysokich, za którymi próbuje podążać ewolucja systemów konstrukcyjnych. Dodatkowym czynnikiem, który mógłby powstrzymać dalszy rozwój budownictwa wysokiego to jedynie możliwości finansowe inwestorów. W myśl znanej na całym świecie maksymy/ cytatu: „Only sky is the limit” - „*Tylko niebo jest granicą*” można założyć, iż światowe tendencje rozwoju technik konstrukcyjnych oraz ewolucji form architektonicznych będą coraz śmielsze i odważniejsze. Obecny stan badań przedstawiony w niniejszej dysertacji, w niedalekiej przyszłości może stać się również nieaktualny. Wysoka dynamika wznoszenia wieżowców oraz symboliczna chęć osiągnięcia przez człowieka „*czegoś nowego*”, niekoniecznie najwyżej

położonego punktu, pozwoli na spełnienie szeregu uwarunkowań stawianych w procesie projektowym oraz w samej realizacji inwestycji. Związki i relacje struktur przestrzennych budynków wysokich z formą architektoniczną są spektakularne, podobnie jak ma to miejsce przy realizacjach przekryć o dużych rozpiętościach.

Współczesne tendencje projektowe budynków wysokich zmierzają w stronę ograniczenia kosztów realizacji przedsięwzięcia poprzez uwzględnienie w procesie projektowym zależności aerodynamicznych związanych z obciążeniem wiatrem, a formą architektoniczną budynku wysokiego. Wyniki badań [41,42,73,74] związanych z projektowaniem budynku wysokiego na obciążenie dominujące, jakim jest wiatr wskazują, iż nawet niewielka zmiana geometrii rzutu poziomego poprzez wprowadzenie opływowych kształtów bryły obiektu może zmniejszyć o 25% wartości sił wewnętrznych działających w elementach nośnych. Obserwowane w ostatnich latach realizacje pokazują dominującą tendencję projektowania budynków o formach zakrzywionych i opływowych. Odchodzi się zatem od typowych form prostopadłościennych znanych z realizacji lat 70 i 80 ubiegłego wieku. Przy obecnych możliwościach technicznych stosowania badań w tunelach aerodynamicznych proces projektowania symbolu potęgi lub ikony architektury, jakim może być budynek wysoki, staje się znacznym ułatwieniem. Szczegółowo przedmiotowe zagadnienia opisano w rozdziale nr 3.7 niniejszej pracy. Drugim wyodrębnionym czynnikiem w procesie projektowania i realizacji wieżowców są działania o charakterze ekologicznym. Nurt projektowy określany, jako "*eko-tech*" i "*high-tech*" wykorzystany w procesie projektowania i wznoszenia budynku wysokiego staje się oprócz oczywistych względów związanych z oszczędnością energii, również manifestacją indywidualizmu inwestora.

Zamieszczony w dalszej części atlas współczesnych budynków wysokich przedstawiony w rozdziale 8 pod nazwą "Ankes" to studium przypadków, które zostały wybrane przez autora, jako obiektów najbardziej reprezentatywnych, które odpowiadają postawionym tezom w niniejszej pracy. Nie jest to atlas najwyższych budynków, które można odnaleźć w licznych materiałach źródłowych lub dokumentach archiwalnych. Zebrane przykłady wynikają z dogłębnej analizy, która pokazuje interesującą współzależność architektury i konstrukcji. Przedstawione przykłady zostały wyselekcjonowane w taki sposób, aby przy różnorodności form

architektonicznych i zastosowanych systemów konstrukcyjnych przedstawić światowe tendencje ewolucji determinant kształtowania bryły budynku wysokiego. Każdy uwzględniony przykład zawiera co najmniej jedną indywidualną cechę, która definiuje prawidłowe rozwiązania projektowe. Atlas budynków wysokich jest własną, indywidualną analizą autorską, która nie wpisuje się w schematy układów poznawczych żadnych uprzednio opracowanych zestawień znanych w literaturze przedmiotu.

Ze względów praktycznych analiza obiektów wysokościowych ujęta w rozdziale 8 została zawężona do przedstawienia cech odpowiadających podjętej tematyce dysertacji, którą uznałem jako najbardziej reprezentatywną i twórczą dla wyjaśnienia uwarunkowań projektowania budynków wysokich.

### **3. Podstawowe wymogi procesu projektowania budynku wysokiego**

#### **3.1. Określenie i uzasadnienie zakresu tematycznego dotyczącego rozpatrywanych wymogów**

W literaturze przedmiotu oraz licznych opracowaniach branżowych opisujących technologię wznoszenia budynków wysokich znajdziemy szereg definicji opisujących wieżowce. Różne określenia definiujące budynki wysokie odnoszą się do określonego wąskiego zagadnienia związanego z realizacją budynku wysokiego. Podjęta w niniejszej dysertacji analiza większości zagadnień projektowych oraz wykonawczych w odniesieniu do przenikających się w przedmiotowym procesie dwóch dyscyplin, jakimi są architektura i konstrukcja, wskazuje potrzebę określenia wymogów i uwarunkowań związanych z powstaniem obiektu wysokościowego. Według międzynarodowej organizacji zajmującej się budynkami wysokimi - Council on Tall Building and Urban Habitat definicja budynku wysokiego powinna być sformułowana w następujący sposób: *„Budynek wysoki to taki obiekt, którego wysokość wpływa w sposób decydujący na jego*

*planowanie, projektowanie, wykonawstwo i użytkowanie*”.<sup>6</sup> W podstawowej definicji pominięto celowo określenia związane z liczbą kondygnacji lub wysokością obiektu.

W niniejszej dysertacji oraz w postawionych tezach również celowo unika się klasyfikowania obiektów jedynie według miary wysokości lub liczby kondygnacji. Podjęta tematyka w sposób naturalny będzie zawierać informacje dotyczące wysokości obiektów lub ich klasyfikowania do danej grupy o zdefiniowanych determinantach strukturalnych oraz szeregu uwarunkowań technicznych. Jednakże sama miara wysokości nie jest nadrzędnym czynnikiem w podjętej analizie lub syntezie uzyskanych wniosków. Podjęte analizy uwarunkowań stanowią istotne tło badawcze niniejszej rozprawy dotyczącej obiektów wysokościowych. Przyjęte założenia odnoszące się do uwarunkowań realizacji procesu powstawania budynku wysokościowego stanowią autorski, interdyscyplinarny schemat opisujący złożone zależności zachodzące przy projektowaniu obiektów.

Przedstawione poniżej analizy techniczne są rezultatami szczegółowych syntez danych technicznych znajdujących się w materiałach źródłowych.

### **3.2. Uwarunkowania przestrzenne, historyczne i kulturowe**

Budynki wysokie wymagają nowego podejścia do zagadnień projektowania przestrzeni śródmiejskiej miasta [57] ze szczególnym uwzględnieniem zabudowy historycznej, która w Europie jest szczególnie chroniona ze względu na skalę zniszczeń spowodowanych przez pierwszą i drugą wojnę światową.

Utworzony drugi poziom miasta poprzez zabudowę wysoką powinien pozytywnie oddziaływać na poprawę jakości przestrzeni miejskiej. Sylwety historyczne miast Europy są chronione poprzez lokalizację zabudowy budynków wysokościowych w wyznaczonych miejscach, aby nie zdominowały przestrzeni istniejącego krajobrazu miejskiego. Projektanci architektury przeważnie uwzględniają uwarunkowania przestrzenne miast w ośrodku europejskim i dążą do realizacji obiektu wysokościowego w oddaleniu od ścisłej zabudowy historycznej.

Takie rozwiązanie pozwala na stworzenie nowoczesnej panoramy miasta europejskiego.

---

<sup>6</sup> Źródło: [i10]

Zwracanie uwagi na kontekst urbanistyczny i ochronę spuścizny architektonicznej zabytkowych linii widokowych przyczyniło się do utworzenia pod koniec lat 50 XX wieku w Paryżu dzielnicy biznesowej o nazwie La Defense (Rys. 3.2.1 a i b) oddalonej od ścisłego centrum miasta, choć na przedłużeniu historycznej osi miasta.



a)

Rys. 3.2.1a Dzielnica La Defense  
- model układu przestrzennego  
Źródło: [i11]



b)

Rys. 3.2.1b Dzielnica La Defense, jako  
wyodrębniona struktura przestrzenna na tle  
miasta Paryża Źródło: [i1]

Władze miasta chcąc uszanować zabytkowe centrum Paryża postanowiły rozbudować system transportu kolejowego, metra oraz dróg, aby zrewitalizować wyznaczony teren i tam zlokalizować wysoką zabudowę. Podobną koncentrację wieżowców wynikającą z rosnącego zapotrzebowania na powierzchnię użytkową stanowi dzielnica Canary Wharf (Rys. 3.2.2) w Londynie. W ramach rewitalizacji opustoszałych doków pod koniec lat 70 XX wieku rozpoczęto prace urbanistyczne i planistyczne lokowania tam zabudowy wysokiej. Londyńska dzielnica wieżowców scala w sobie założenia urbanistyczne podobne do nowojorskiej nadrzecznej dzielnicy oraz zasad zagospodarowania przestrzennego zaczerpniętych z dzielnicy La Defense. Istotną różnicą pomiędzy dzielnicami jest odmienne podejście Londynu to rygorystycznego określenia wysokości budynków niż jest to w Paryżu [53].



Rys. 3.2.2 Dzielnica Canary Wharf w Londynie na tle panoramy miasta  
Źródło: [i1]

Od powyższej zasady jest szereg wyjątków dotyczących miast, w których lokacja wysokiej dominanty budynku wysokiego w centrum jest neutralna i nie budzi negatywnych skojarzeń. Model zabudowy wysokiej w ścisłym centrum odzwierciedla amerykański model „miasta biznesu i urzędów - tzw. "downtown", jaki znamy z Chicago lub Nowego Jorku. Przykładem miasta europejskiego, o takiej zabudowie była początkowa struktura przestrzenna Londynu, gdzie centrum miasta stało się światowym centrum finansowym tworząc tzw. „City” (Rys. 3.2.3) oraz nowo powstająca dzielnica Millenium Quarter. Model zabudowy Londynu, ze względu na późniejsze utworzenie dzielnicy Canary Wharf na terenie dawnych doków, jest formą hybrydy kilku rozwiązań planistycznych.

Przykładem miasta, w którym od samego początku lokowano budynki wysokościowe w centrum jest Frankfurt nad Menem (Rys. 3.2.4). Wybór modelu amerykańskiego, w tym przypadku był związany z szeregiem uwarunkowań począwszy od politycznych, motywowanych chęcią wykreowania nowej potęgi miejskiej na tle obudowujących się po II wojnie światowej miast, do uwarunkowań planistycznych związanych z koniecznością wypełnienia zapotrzebowania na powierzchnie biurowe oraz bliską odległością międzynarodowego portu lotniczego.



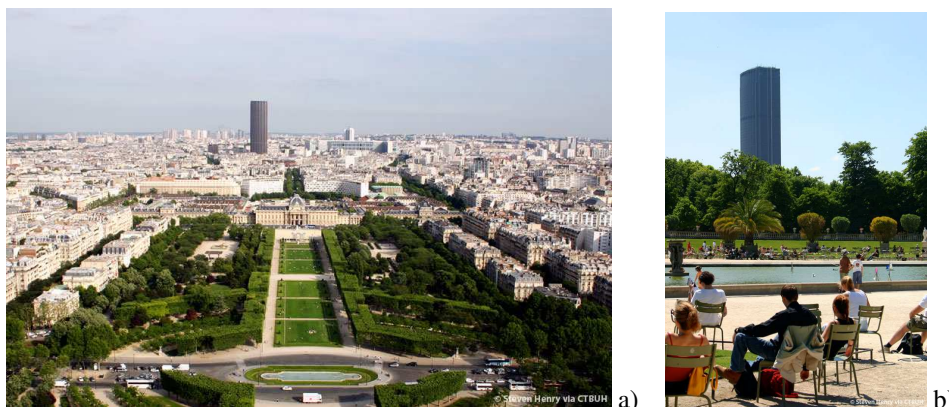
Rys. 3.2.3 Londyńskie centrum "City" na tle panoramy miasta  
Źródło: [i1]



Rys. 3.2.4 Panorama miasta Frankfurt nad Menem z zabudowa wysoką  
Źródło: [i1].

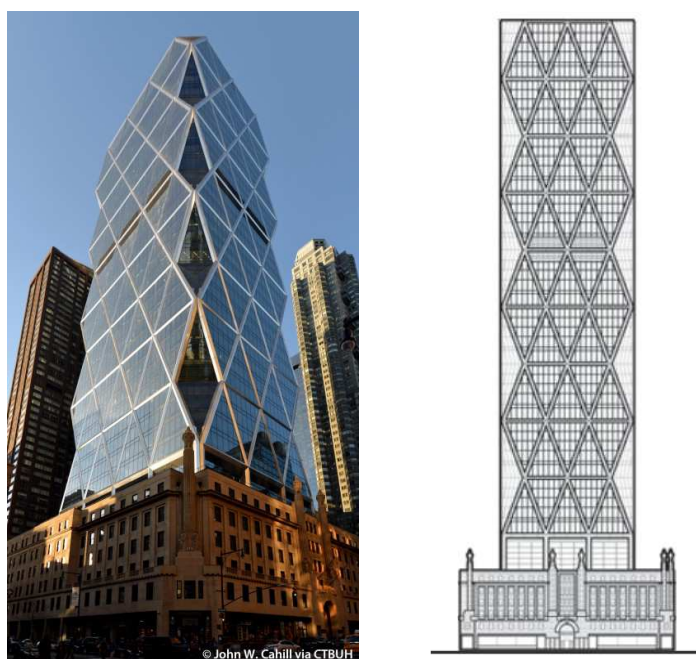
Powojenny układ przestrzenny miasta europejskiego, był i nadal jest w dużej mierze pod szczególnym zainteresowaniem różnych organizacji społecznych i urbanistycznych. Przykładem odzwierciedlającym obecny stan opisywanego zagadnienia, może tutaj być Madryt oraz dynamicznie rozwijający się ośrodek miejski, jakim jest Moskwa.

W historii współczesnego budownictwa wysokiego w Europie można znaleźć przykłady negatywne, których nie udało się scalić w istniejącą tkankę miejską. Negatywny odbiór społeczny miała realizacja wieżowca Tour Montparnasse (Rys. 3.2.5 a i b) w Paryżu, w niedalekiej odległości od zapewne najważniejszego symbolu architektonicznego miasta, jakim jest wieża Eiffla. Zaburzenie linii widokowej dzielnicy o głównie pięciopiętrowej zabudowie potwierdziło słuszność budowy odrębnej dzielnicy wieżowców La Defense. Od momentu wybudowania w 1972 roku masywnej i wysokiej dominanty w zabytkowym centrum, zakazano wznoszenia wieżowców poza wyznaczonym terenem dzielnicy La Defense.



Rys. 3.2.5 a i b Tour Montparnasse, jako przykład negatywnego oddziaływania obiektu na przestrzeń miejską  
 Źródło: [i1]

Wnioski wynikające z analizy negatywnego wpływu budynku wysokiego na otoczenie spowodowały bardziej wyczulony nurt projektowy zabudowy historycznej miast. Jednym z interesujących aplikacji budynków wysokich w tkance historycznej jest zrealizowany w 2006 roku budynek o nazwie Hearst Tower (Rys. 3.2.6) autorstwa pracowni Foster & Partners. Obiekt o wysokości 182 metrów wyrasta z sześciopiętrowego budynku zaprojektowanego w stylu Art Deco zrealizowanego w 1928r. Obiekt został wskazany jako wzorcowy przykład współzależności historycznej zabudowy z obiektami wysokościowymi, które często określane są jako symbolika współczesnych trendów projektowych [53].



Rys. 3.2.6 Budynek Hearst Tower w Nowym Jorku  
 Źródło: [i1]



Prawidłowa realizacja budynków wysokich w historycznej zabudowie miasta została zapoczątkowana w Mediolanie [39], gdzie powstał 127 metrowy budynek Pirelli, o dotąd niespotykanych rozwiązaniach technicznych związanych z przeszklonymi fasadami. Do dziś zarówno obiekt, jak i jego najbliższe otoczenie stanowi wzorzec interesującej formy architektonicznej budynku oraz procesów zachodzących w przestrzeni urbanistycznej.

Zrealizowany w Londynie w 2004 roku wieżowiec Swiss Re<sup>7</sup>, o wysokości 180 metrów autorstwa biura Foster & Partners, po spełnieniu założeń strategii rozwoju miasta, w sposób interesujący wpisuje się w zabudowę historyczną kontrastując równocześnie z zabytkowym budynkiem St. Andrew Undershaft (Rys. 3.2.7 a i b).



Rys. 3.2.7 a i b Budynek Swiss Re w Londynie w ścisłej zabudowie historycznej Londynu (a) Źródło: [i36] oraz (b) fotografia autorska dr inż. S. Jurczakiewicz

W innych ośrodkach geograficznych, jakie można wyodrębnić w procesie globalizacji wznoszenia budynków wysokich, czyli w Ameryce i Kanadzie oraz Azji i na Bliskim Wschodzie, zasady lokacji budynków wysokich są nieco odmienne. Budynki wysokie zostały wkomponowane we wcześniejszą zabudowę i pomimo

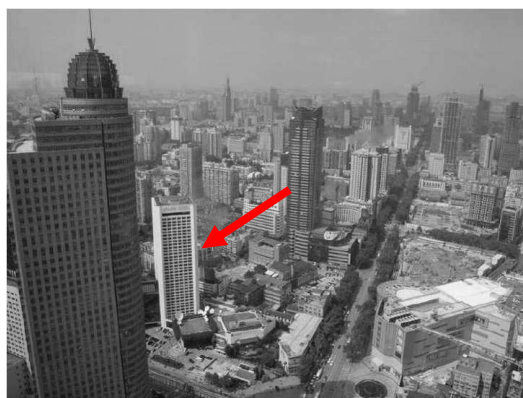
<sup>7</sup> Druga nazwa budynku to 30 St Mary Axe

powstania lokalnych wysokich dominant ich odbiór jest pozytywny lub przynajmniej odbierany jest w sposób neutralny (Rys. 3.2.8 a i b; Rys. 3.2.9 a i b).



Rys. 3.2.8 a Centrum miasta Nankin w Chinach w roku 1980

Źródło: [31] Autor zdjęcia: A. Jasiński



Rys. 3.2.8 b Centrum miasta Nankin w Chinach w roku 2008

Źródło: [31] Autor zdjęcia: A. Jasiński



Rys. 3.2.9 a Centrum Dubaju - rok 1990

Źródło: [17]

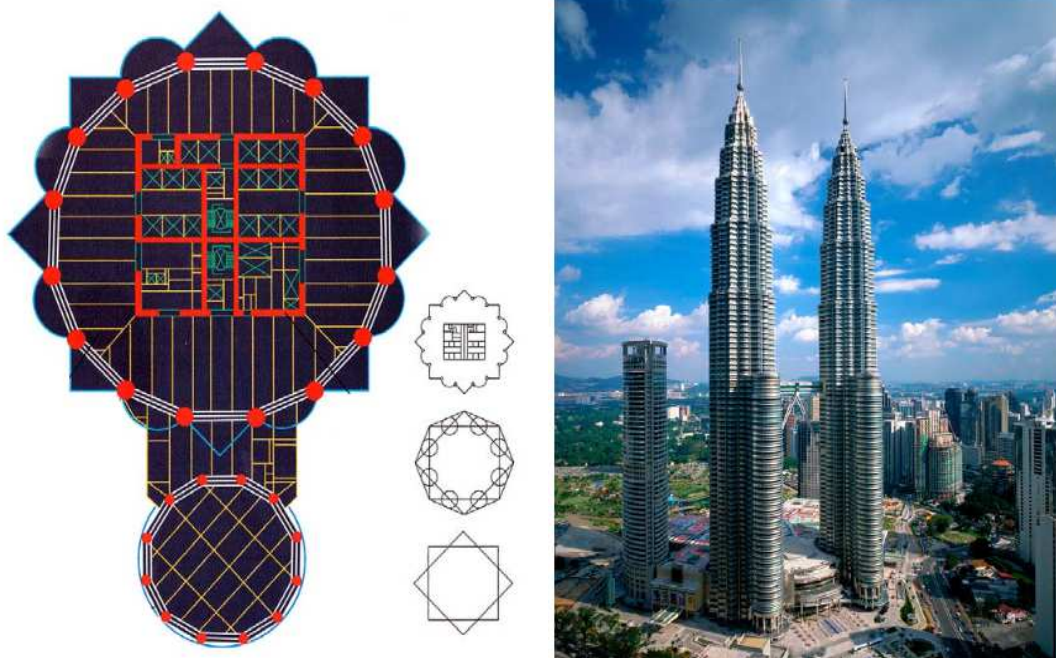


Rys. 3.2.9 b Centrum Dubaju - rok 2007

Źródło: [17]

Lokalizacja obiektu wysokościowego w Azji i na Bliskim Wschodzie jest inaczej pojmowana niż w Europie [31]. Realizacja wieżowca w tych ośrodkach geograficznych odbierana jest w podstawowym znaczeniu, jako manifestacja potęgi i mocarstwowości związana z kryterium finansowym. Przedstawione dwa modele lokalizacji wieżowców w postaci wyodrębnionych osobnych dzielnic oraz lokalizacji wieżowców w centrum miasta przy zachowaniu rygorystycznych uwarunkowań planistycznych nie zawsze są odzwierciedleniem realizacji budynków wysokich w państwach Bliskiego Wschodu czy Azji. Wiele analiz urbanistycznych ocenia początkową ich zabudowę jako chaotyczną i niekontrolowaną, podając przykład Szanghaju, Hong Kongu czy Dubaju. Jednakże ewolucja tej intensywnej, choć niekontrolowanej w pierwszym etapie zabudowy, przyczyniła się do

utworzenia w ostateczności modelu przestrzennego miasta o indywidualnej formie, która ostatecznie nie ma negatywnego odbioru. Wieżowce azjatyckie łączą technikę wznoszenia najwyższych obiektów na świecie z symboliką „kultury Wschodu” lub religii. Ukształtowanie fasad budynków oraz ich zwieńczeń stanowi jedną z dominujących cech nawiązań kulturowych i symbolicznych. Kształty szczytów wieżowców projektowane są kierując się stosowanym rytmem wynikającym ze stosowania powtórzeń ośmiu elementów, które w symbolice azjatyckiej stanowi odzwierciedlenie szczęścia. Zaprojektowanie zwieńczenia w postaci przesuniętych względem siebie kwadratów tworząc kształt ośmioramienną gwiazdy w budynku Petronas Twin Tower (Rys. 3.2.10), która odzwierciedla porządek i harmonię [21], wykorzystanie symboliki chińskiej pagody w formie przestrzennej budynku Jin Mao Tower (Rys. 3.2.11), tworzenie powtórzeń liczby osiem w postaci liczby kondygnacji danego modułu i symboliki medalionów odzwierciedlających kształt monety, a więc wróżby powodzenia w przedsięwzięciach finansowych uwidocznione w detalach architektonicznych budynku Taipei 101, jest dominującym nurtem projektowym wieżowców azjatyckich.



Rys. 3.2.10 Budynki Petronas Tower w Kuala Lumpur w Malezji

Źródło: [i1]



Rys. 3.2.11 a i b Jin Mao Tower w Szanghaju  
Źródło: [i1]

Architektoniczne formy geometryczne budynków azjatyckich najczęściej odpowiadają symbolice kultury i dumy narodowej, co dobitnie widoczne było podczas realizacji budynku Shanghai World Financial Center (Rys. 3.2.12 a i b), gdzie zwieńczenie budynku pierwotnie zaprojektowano z okrągłym otworem, co miało skojarzenie do flagi Japonii, choć w pierwotnym założeniu nawiązywało do form starych ogrodów Chińskich [52]. Chińczycy ze względu na swoją dumę narodową nie chcieli dopuścić do negatywnego odbioru ikonicznego budynku i przeprojektowali otwór do kształtu odwróconego trapezu. Rola super wysokich budynków azjatyckich, w których wysokość obiektu stała się główną determinantą w całym procesie projektowym, to również manifestacja potęgi politycznej i finansowej.



Rys. 3.2.12 a i b Budynek Shanghai World Financial Center ze swoim charakterystycznym prostokątnym otworem na szczycie  
Źródło: [i1]

Budynkiem nawiązującym do symboliki walki samurajskiej w kulturze wschodu jest wieżowiec Bank of China, którego forma przestrzenna nawiązująca do kształtu „tasaka” [39] jest manifestacją potęgi finansowej i została skierowana na budynek konkurencji, jakim jest HSBC – Hongkong and Shanghai Bank Corporation (Rys. 3.2.13).



Rys. 3.2.13 Panorama sąsiedztwa budynków Bank od China i HSBC  
Źródło: [i1]

W Shanghaju zrealizowane w bliskiej odległości od siebie trzy wieżowce (Rys. 3.2.14), Jin Mao Tower, Shanghai Tower oraz Shanghai World Financial Center mają symbolizować historię i tradycję chińskiej pagody, mocarstwowość i wysoką pozycję kraju oraz nowoczesną przyszłość Państwa Środka [53].



Rys. 3.2.14 Panorama Shanghaju z trzema charakterystycznymi budynkami mającymi odzwierciedlenie w symbolice kultury Chin  
Źródło: [i1]

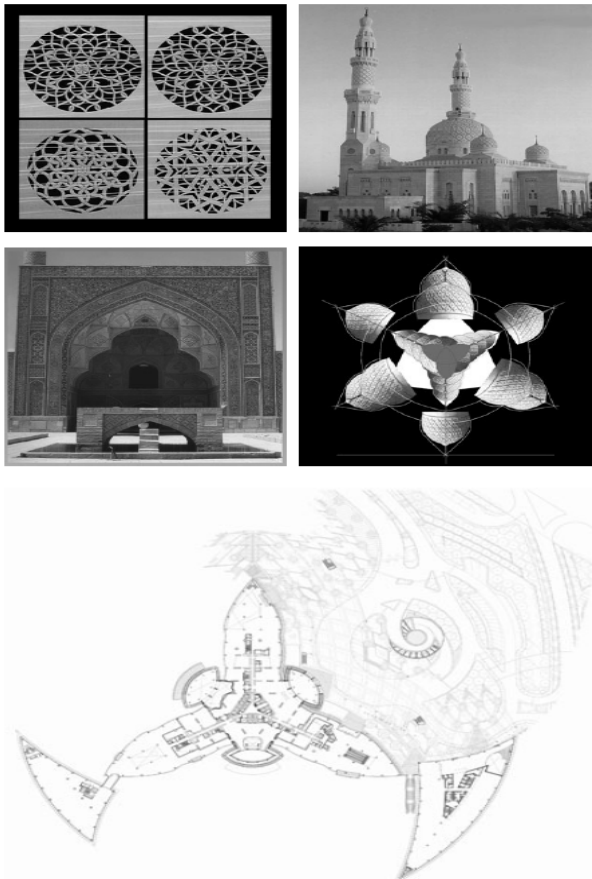
Kolejnym reprezentatywnym przykładem związanym z metodologią odniesień do sfery kultury w zabudowie wysokiej, są wieże Petronas Twin Tower w Kuala Lumpur oraz zespół obiektów zlokalizowanych w Hong Kongu takich, jak International Commers Center oraz Two International Financial Center tworzące symboliczne „bramy” miast i regionów.

Budowanie symbolu „bram” miast i państw można zaobserwować również w Europie. Przykładem Europejskiej "bramy" jest Madryt wraz z bliźniaczymi 115 metrowymi budynkami pochylonymi pod kątem 15 stopi o nazwie Puerta de Europa (Rys. 3.2.15. a i b).

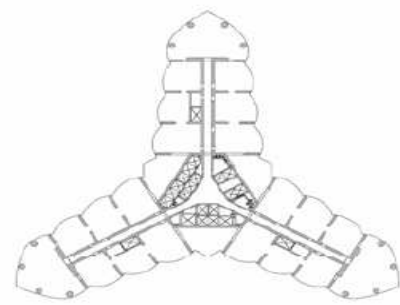


Rys. 3.2.15 a i b Budynki Puerta de Europa w Madrycie  
Źródło: [i37]

W krajach Bliskiego Wschodu, a w szczególności w Zjednoczonych Emiratach Arabskich i Arabii Saudyjskiej, uwarunkowania kulturowe i religijne są szczególnie widoczne w przyjętej formie i detalach architektonicznych budynków wysokich. Kulturowa tożsamość miejsca jest widoczna w realizacjach również budynków azjatyckich [21]. Poszukiwanie pożądanej oraz optymalnej formy lub atrakcyjnego rzutu poziomego budynku rozpoczyna się w nawiązaniu do wzorców istniejących w lokalnej kulturze i sztuce Bliskiego Wschodu. Obecnie najwyższy budynek świata Burj Dubaj o wysokości 828 metrów nawiązuje kształtem swojego rzutu poziomego do kwiatu pustyni (Rys. 3.2.16, Rys. 3.2.17).

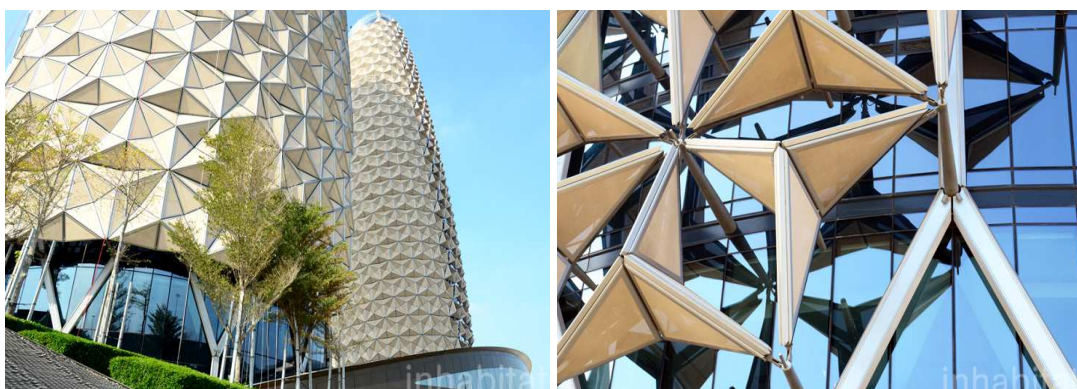


Rys. 3.2.16 Nawiązanie kształtów kultury arabskiej do form i kształtów budynków  
Źródło: [i38]



Rys. 3.2.17 Rzut poziomy piętra budynku Burj Dubai oraz wizualizacja elewacji obiektu  
Źródło: [6]

Reprezentatywnym przykładem, w którym możemy zaobserwować zjawisko czerpania wzorców z tradycyjnej architektury arabskiej, są wieże Al Bahr Towers w Abu Dhabi. Kompozycja geometryczna bliźniaczych budynków jest definiowana przez figury geometryczne w postaci okręgów i ich wielokrotnego ich obrotu względem osi, które są wyrazem poszukiwań unifikacji i jedności [30]. Wraz z poszukiwaniem optymalnego kształtu budynków wysokich pod względem aerodynamicznym, starano się opracować nowoczesny system ochrony obiektów przed nadmiernym nagrzewaniem. Wypracowane przed wiekami przez lokalne społeczności sposoby ochrony przed wysoką temperaturą i nasłonecznieniem w postaci ażurowych przesłon określane są nazwą „mashrabiya”. Współczesnym odzwierciedleniem takiej przesłony jest zaprojektowana przez biuro Adeas membrana ETFE (Rys. 3.2.18 a i b) rozpiętą na ruchomym stalowym stelażu znajdującym się w pewnej odległości od szklanej fasady wieżowców.



Rys. 3.2.18 a i b Współczesna „mashrabiya” zamontowana na budynkach Al Bahr  
Źródło: [i1]

Wieże Al Bahr są przykładem koegzystencji najnowszych technologii z kulturowym kontekstem krajów Bliskiego Wschodu.

W krajach azjatyckich, gdzie zabudowa wysoka rozwija się również w sposób wyjątkowo dynamiczny takich, jak Chiny, Tajwan, Malezja czy Korea Południowa, odnajdziemy liczne przykłady uszanowania zasad kultury i religii w projektowaniu obiektów rozpoznawalnych na całym świecie.

### **Krótkie podsumowanie:**

Przedstawione uwarunkowania przestrzenne, historyczne i kulturowe form oraz struktur wieżowców są zdefiniowane w sposób odmienny dla różnych ośrodków geograficznych. W obszarze o nazwie „*Europa i Rosja*” projektowane są budynki o mniejszej wysokości, ale w poszanowaniu do istniejącej zabudowy historycznej, co jest widoczne w postaci realizacji dwóch podstawowych modeli lokalizacji wieżowców. W ośrodkach, takich jak „*Azja i Bliski Wschód*” gdzie wznoszone są najwyższe obiekty, nie ma klarownych podziałów związanych z wyodrębnieniem osobnych dzielnic. Dynamiczna zabudowa przestrzeni miejskiej spowodowała powstanie indywidualnego modelu terenów silnie zurbanizowanych poprzez zabudowę budynków wysokich. Przykładem znakomicie odzwierciedlającym to zagadnienie jest obszar w Dubaju o nazwie Palm Island Dubaj (Rys. 3.2.19).





Rys. 3.2.19 Dubaj Marina - sztucznie utworzona przestrzeń pod zabudowę wysoką  
Źródło: [i39]

W obiektach azjatyckich, a w szczególności realizowanych na Bliskim Wschodzie, obserwujemy znaczące odzwierciedlenie graficznych motywów kultury orientalnej oraz religijnej w formie geometrycznej wieżowców. Budynki wysokościowe w Stanach Zjednoczonych, jako pierwowzory wieżowców świata, mają własną „logikę” [31], która wpisuje się w indywidualną topografię miast amerykańskich, rozplanowanych na głównie ortogonalnych siatkach ulic i skwerów. Intensywna zabudowa śródmieścia miast amerykańskich tworzących lokalne "city" lub "downtown" określa biznesowy i administracyjny model oddziaływania budynków wysokich na otaczającą przestrzeń.

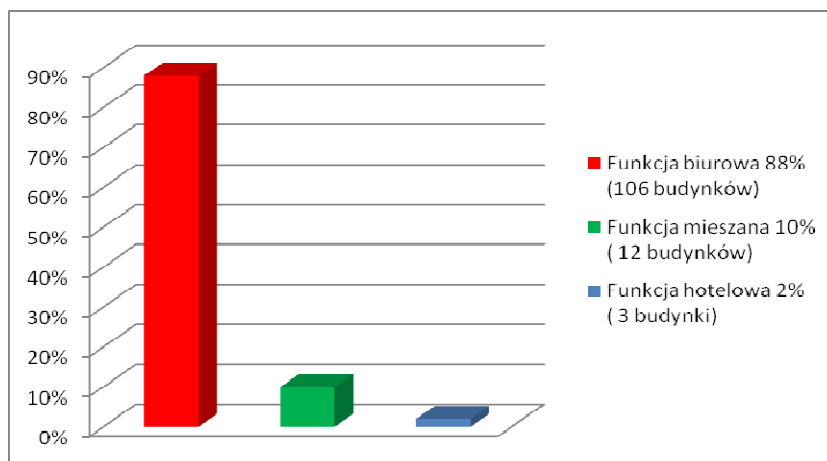
Niezależnie od przyjętego modelu uwarunkowań przestrzennych, historycznych czy kulturowych budynek wysoki będzie miał znaczący wpływ na ewolucję lub rozwój przestrzenny współczesnych miast świata.

### **3.3. Uwarunkowania społeczno-użytkowe, gospodarcze i ekonomiczne**

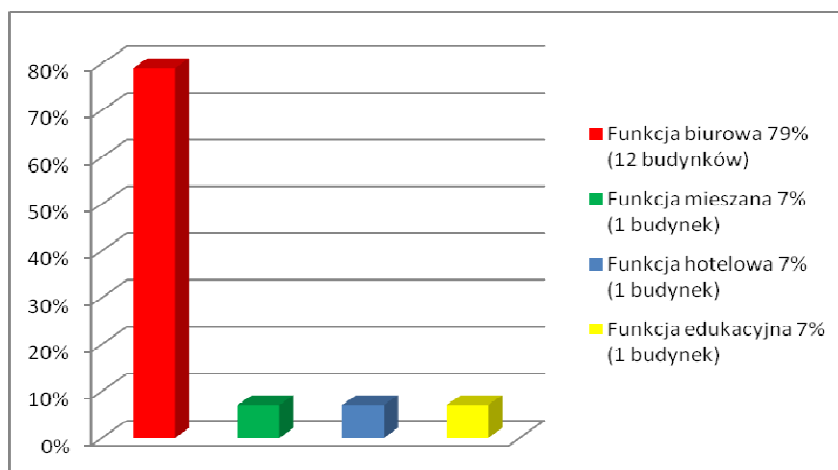
Światowe tendencje obserwowane ostatnio w procesach projektowania współczesnych budynków wysokich mających powyżej 200 metrów wysokości wskazują, iż zagadnienia społeczne związane z adaptacją jednej funkcji w wieżowcu są zastępowane rozwiązaniami mieszanymi. Wprowadzenie wielu funkcji użytkowych podnosi atrakcyjność obiektu oraz wartość materialną całej

nieruchomości. Uwarunkowania czasowe realizacji budynków wysokich wynikające z cech społecznych oraz gospodarczych wskazują, iż w okresie pomiędzy rokiem 1960 a 1990 dominującymi stałymi funkcjami danego obiektu były przestrzenie biurowe (Rys. 3.3.1). Poszukując odniesienia postawionej tezy do wcześniejszych lat wznoszenia budynków wysokich począwszy od 1885 roku, kiedy powstaje The Home Insurance Building w Chicago uznany za pierwszy wieżowiec ze względu na zastosowany ustrój nośny stalowo-żeliwny, do lat 60 XX wieku podstawową funkcją również były biura (Rys. 3.3.2). Dobór granicznych dat związany jest ze zmianami zachodzącymi w projektowaniu i realizowaniu budynków wysokich. W latach 60 XX wieku konstruktor Fazlur Khan proponuje nowe systemy konstrukcyjne związane z innowacyjnymi układami powłokowymi i megastrukturami dla budynków wysokich, które stały się fundamentalnymi rozwiązaniami stosowanymi w wielu rozpoznawalnych wieżowcach na całym świecie.

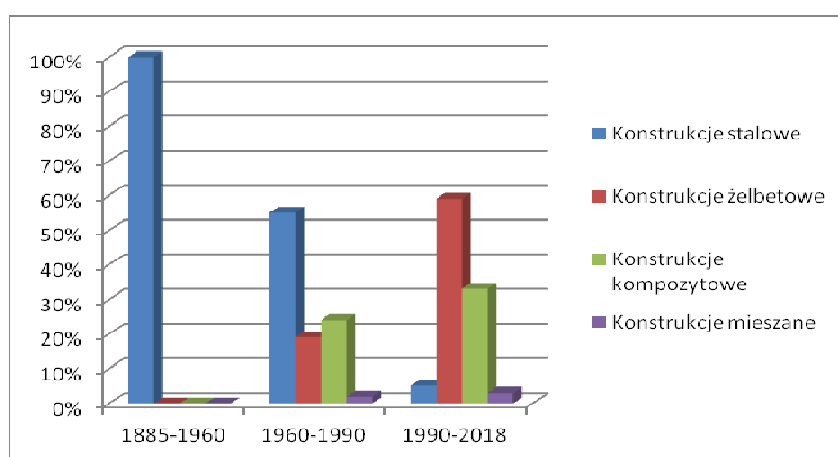
Koniec XX wieku i początek XXI wieku jest okresem znaczących zmian w doborze materiałowym systemów konstrukcyjnych budynków wysokościowych. Dominacja konstrukcji stalowych zostaje zastąpiona rozwiązaniami układów żelbetowych i kompozytowych (Rys. 3.3.3) stosowanych szczególnie dla funkcji mieszkalno-hotelowych. Budynki o funkcji mieszkalnej, hotelowej lub mieszanej wymagają ograniczenia maksymalnych wychyleń wierzchołków wieżowca. Postawienie wymagań w projekcie rzędu  $f < H/1000 \div H/1200$  [57] preferuje aplikację ustrojów żelbetowych dla obiektów o wskazanej funkcji użytkowej. Wraz ze zmianą materiałową strukturalnych układów budynków wysokich w latach 90 XX wieku następuje powolne odejście od mono-funkcji użytkowej wieżowca w formie biur na rzecz funkcji mieszanych. W ostatnich trzech dekadach coraz częściej dominującym przeznaczeniem społeczno-użytkowym budynku jest funkcja mieszana w wieżowcu taka jak: mieszkalno-hotelowa, biurowo-hotelowa lub mieszkalno-biurowa [53] (Rys. 3.3.4).



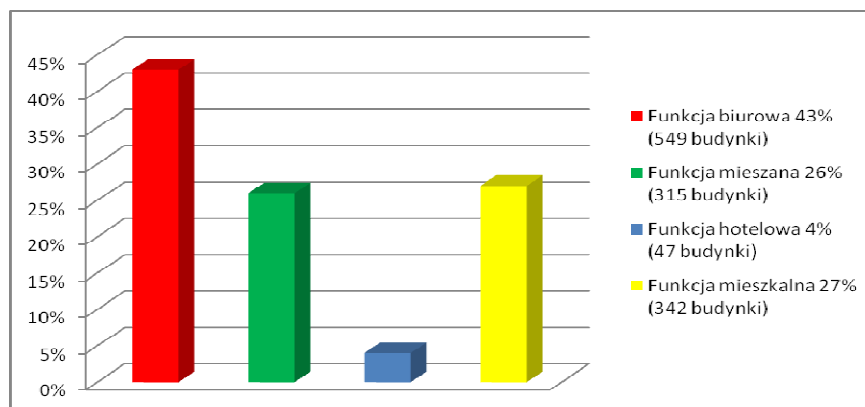
Rys. 3.3.1 Podział na funkcje użytkowo-społeczne wieżowców w latach 1960r-1990r  
 Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]



Rys. 3.3.2 Podział na funkcje użytkowo-społeczne wieżowców w latach 1885r-1960r  
 Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]



Rys. 3.3.3 Udział rodzaju konstrukcji budynku w analizowanych okresach czasu  
 Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]



Rys. 3.3.4 Podział na funkcje użytkowo-społeczne wieżowców w latach 1990r-2018r  
 Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z 11]

Budynek wysokościowy nie jest tylko wewnętrzną przestrzenią użytkową, ale w dużej mierze jest przedsięwzięciem finansowo-ekonomicznym. Inwestorzy chcąc uzyskać zakładane wskaźniki ekonomiczne dążą do dywersyfikacji funkcji, tworząc społeczno-użytkowe hybrydy. W obiektach wysokościowych zdarzają się, choć są to wyjątki od reguły, inne funkcje niż wymienione powyżej [88], takie jak szkoły, przedszkola czy szpitale. Ciekawą aplikacją wielu funkcji użytkowo-społecznych w obrębie jednego obiektu jest budynek Eight Spruce Street<sup>8</sup> (Rys. 3.3.5 a i b) w Nowym Jorku. Wieżowiec o wysokości 272 metrów został zaprojektowany przez znanego architekta Frank`a Gehry`ego przy zastosowaniu konstrukcji żelbetowej.

W wieżowcu na pierwszych pięciu piętrach znajduje się podstawowa szkoła publiczna, która ma do dyspozycji taras na dachu pełniący funkcję otwartej przestrzeni sportowej. Kolejne kondygnacje powyżej szkoły pełnią funkcje mieszkalne oraz hotelowe. Dodatkową funkcją obiektu, który został otwarty w 2011 roku, jest szpital „New York Downtown Hospital”. Uzupełnieniem wielofunkcyjnego budynku jest publiczny parking znajdujący się w kondygnacji podziemnej. Przedstawiony przykład zrealizowany w badanym okresie ostatnich trzech dekad wskazuje na bardzo interesującą tendencję wykorzystania wieżowca dla funkcji społecznych. Budynek odpowiada na potrzeby społeczno-użytkowe i niewątpliwie nie zagraża tradycyjnej tkance miasta, co przeciwnicy budownictwa wysokiego podnoszą w dyskusjach o słuszności wznoszenia tego rodzaju zabudowy.

<sup>8</sup> Inna nazwa budynku to Beekman Tower



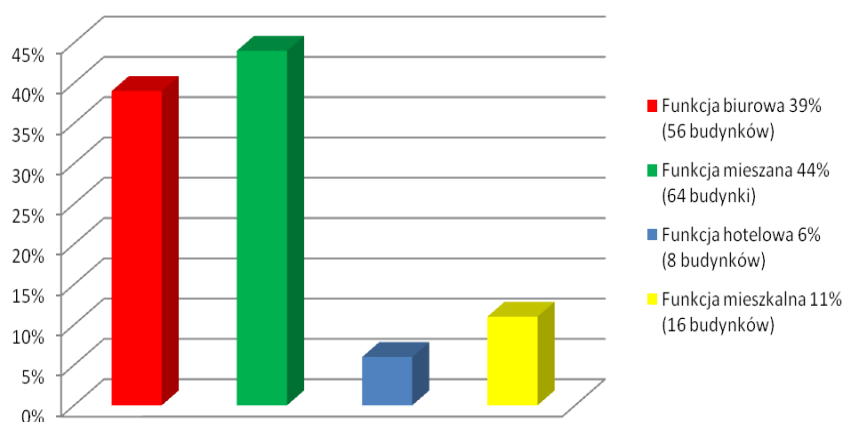
Rys. 3.3.5 a i b Budynek Eight Spruce Street w Nowym Jorku  
Źródło: [i1]

Reprezentatywnym przykładem wznoszenia multi-funkcyjnych budynków wysokich w latach 1960 - 1990 jest wybudowany kompleks Marina City I i II w Chicago (Rys. 3.3.6 a i b) składający się z dwóch niezależnych wież. Budynki powstały w roku 1964 zgodnie z założeniem architektoniczno-społecznym określanym, jako „miasto w mieście”. W 1965 roku obiekty zostały nagrodzone przez nowojorską Kapitułę Amerykańskiego Instytutu Architektów za innowacyjność. Wieżowce te są ciekawą aplikacją modelu mieszanego składającego się z funkcji mieszkalnej i biurowej. W podstawie obu wież znajduje się wielokondygnacyjny parking, który został oddzielony od funkcji mieszkalnych poprzez wysoką kondygnację techniczną. Uzupełnieniem podstawowych funkcji społeczno-użytkowych obiektu są: teatr, sklepy, restauracje, lodowisko, basen, siłownia oraz bezpośredni dostęp do mariny przybrzeżnej. Budynki zaprojektowane przez biuro Bertrand Goldberg & Associates są powszechnie uznawane za wzór odrodzenia symboliki potęgi miast amerykańskich.



Rys. 3.3.6 a i b Budynki Marina City I i II w Chicago  
Źródło: [i40]

Odnosząc wykonaną powyżej analizę uwarunkowań do szeregu opracowań ogólnodostępnych w Polsce i na świecie w celu uzupełnienia danych statystycznych przedstawiono dodatkowo na Rys. 3.3.7 zależności lokalizowania wybranych funkcji społeczno-użytkowych wśród budynków, określanych według definicji stowarzyszenia CTBUH, jako superwysokich, czyli obiektów o wysokości powyżej 300 metrów.



Rys. 3.3.7 Udział procentowy funkcji użytkowych w budynkach powyżej 300 metrów  
Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]

Budowa obiektu wysokiego, jakim jest przedmiotowy wieżowiec, nieodłącznie wiąże się z dużym nakładem finansowym. Inwestorzy nie ujawniają w sposób ogólnodostępny dokładnych danych kosztowych. Miarą ekonomiczną wznoszenia wieżowca, jako racjonalnie wykorzystanych środków, jest stopień zagospodarowania przestrzeni budynku. Najwyższy ukończony obiekt Burj Khalifa w Dubaju o wysokości 828 metrów nie jest w całości wykorzystywany, a tym samym można by uznać, iż koszty poniesione na jego budowę były zbyt duże i ekonomicznie nieuzasadnione.

Przeprowadzone analizy wskazują, iż realizacja wieżowca bardzo wysokiego (ang: megatall) o wysokości powyżej 600 metrów pod względem ekonomicznym jest nieracjonalna i nieuzasadniona w pełnym bilansie finansowym. Możliwości techniczne związane z rozwojem systemów konstrukcyjnych pozwalają wybudować coraz to wyższe budynki. Szereg zakończonych realizacji wskazuje, iż wzniesienie dodatkowych kondygnacji budynku nie przekłada się na zyski ekonomiczne. Realizacja dodatkowych powierzchni użytkowych coraz częściej jest podyktowane jedynie podkreśleniem znaczenia i potęgi finansowej inwestora, jakim jest korporacja, miasto lub państwo [52]. Z pojęciem ekonomiczności wiąże się późniejsza efektywność funkcjonowania obiektu związana z eksploatacją obiektu oraz racjonalnymi nakładami finansowymi dotyczącymi poniesionych kosztów na zużycia energii.

### **Krótkie podsumowanie:**

Trudno określić czy pojawienie się obiektów o takich nietypowych funkcjach użytkowo-społecznych, jak przedstawione reprezentatywne dwa przykłady, będzie coraz częstsze i pozytywnie odbierane przez użytkownika. Realizacja modelu mieszanego w wieżowcach mogłaby uczynić z budynków wysokich prawdziwe miasta w mieście i zrealizować znany postulat dotyczący drugiego poziomu miasta.

### **3.4. Uwarunkowania geologiczne**

Projektowanie budynków wysokich zgodnie z przedstawionymi w niniejszej rozprawie analizami technicznymi i technologicznymi wiąże się z szeregiem uwarunkowań projektowych. Podobnie jak skomplikowane kształtowanie systemu

konstrukcyjnego wieżowca oraz przyjęcie indywidualnej formy architektonicznej części nadziemnej, projektowanie posadowienia budynku jest zagadnieniem niezwykle złożonym [53]. Poprawne zaprojektowanie fundamentów obiektów wysokich jest warunkowane w szczególności rodzajem oraz głębokością występowania gruntów nośnych, rzędnej na której występuje lokalny poziom wodonośny, liczbą kondygnacji podziemnych, wielkością sił poziomych będących konsekwencją wyboru formy architektonicznej wieżowca. Posadowienie budynków wysokich realizowane jest przez szereg dobrze rozpoznanych form fundamentowania, takich jak: płyta fundamentowa, pale żelbetowe, baretty, kesony lub opuszczane studnie. Wśród współczesnych realizacji wieżowców dominują fundamenty zespolone, w których wykorzystuje się współpracę fundamentowania pośredniego w postaci pali żelbetowych oraz fundamentowania bezpośredniego w postaci płyty fundamentowej. Fundament FPP (fundament płytowo-palowy – ang. piled raft foundation) odznacza się wysoką nośnością przy jednoczesnym ograniczeniu osiadań pozwalając określić go, jako system o dużej sztywności. Stopień skomplikowania projektowania posadowienia budynków wysokich wynika z występowania znacznych sił, jakie są przekazywane na fundament.

Siły pionowe w elementach konstrukcyjnych mogą osiągać wartości wynoszące około 35 000 – 40 000 kN [53], co nie jest wartością rzadko występującą, gdyż w budynku Burj Dubai naprężenia ściskające w słupach skrajnych wynoszą odpowiednio 74 MPa [91]. Zapewnienie stateczności wieżowcowi poprzez realizację znacznej liczby kondygnacji podziemnych nie jest we współczesnych budynkach często stosowane. Najbardziej reprezentatywnym przykładem jest Burj Dubai o wysokości 828 metrów, w którym zaprojektowano tylko jedną kondygnację podziemną. Podobną liczbę kondygnacji podziemnych ma Empire State Building w Nowym Jorku o wysokości 381 metrów, który przez blisko 40 lat był najwyższym obiektem na świecie.

Przeprowadzone analizy [53,12,33,34] wskazują, iż najczęściej wieżowce posiadają od 2 do 4 kondygnacji podziemnych, gdyż jest to najbardziej opłacalnie ekonomicznie rozwiązanie. Czas realizacji kondygnacji podziemnej jest co najmniej 2 – 3 razy dłuższy niż części nadziemnej, co również wpływa na dodatkowy koszt realizacji takiej budowy [53]. Zagadnienia dotyczące kształtowania liczby



kondygnacji podziemnych zostało opisane szczegółowo w punkcie 3.5. niniejszej dysertacji.

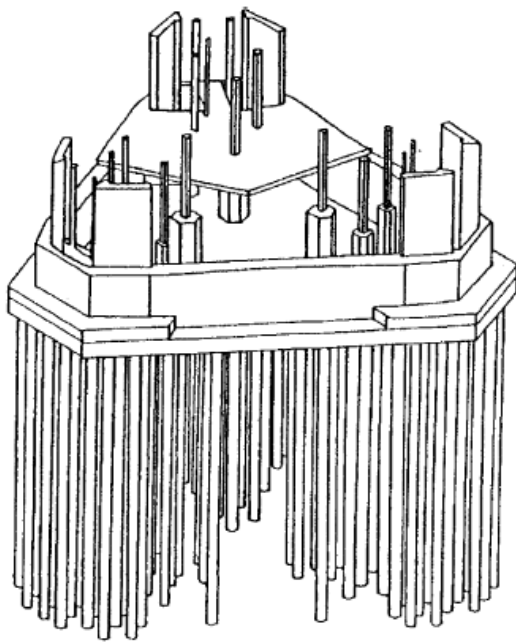
Realizacja fundamentu w postaci klasycznej płyty fundamentowej jest możliwa jedynie na gruntach o dobrych parametrach mechanicznych, wśród których najlepszymi są skały lite. Pierwsze współczesne wieżowce budowane w Nowym Jorku i Chicago miały podłoże skaliste, które pozwoliło na posadowienie budynków o znacznych wysokościach przy istniejącej wówczas technologii systemów fundamentowania. Obecnie klasyczna płyta fundamentowa jest stosowana jedynie dla posadowienia obiektów niższych. Analiza materiałów źródłowych wskazuje, iż grubość płyty fundamentowej pod budynkiem wysokim zawiera się w przedziale od 2 do 4 metrów [12]. Częstym rozwiązaniem technicznym jest stosowanie płyty fundamentowej o różnej grubości w obrysie budynku oraz wspomaganie jej kesonami lub baretami. Wzmocnienie płyty fundamentowej poprzez kesony jest rozwiązaniem najstarszym i bardzo rzadko obecnie stosowanym ze względu na skomplikowaną technologię jej wykonania na terenie budowy. Przyjmuje się, iż kesony były pierwowzorem współcześnie stosowanego rozwiązania w postaci pali wielkośrednicowych o średnicy dochodzącej do 2,5 metra.

Obiektem, który jest rozpoznawany na całym świecie, przy którym użyto fundamentu wspomaganego kesonami jest John Hancock Center o wysokości 344 metrów w Chicago. Projektantem budynku był konstruktor Fazlur Khan, który zaprojektował kesony, których długość związana była z występowaniem gruntów nienośnych do głębokości około 40 metrów [91].

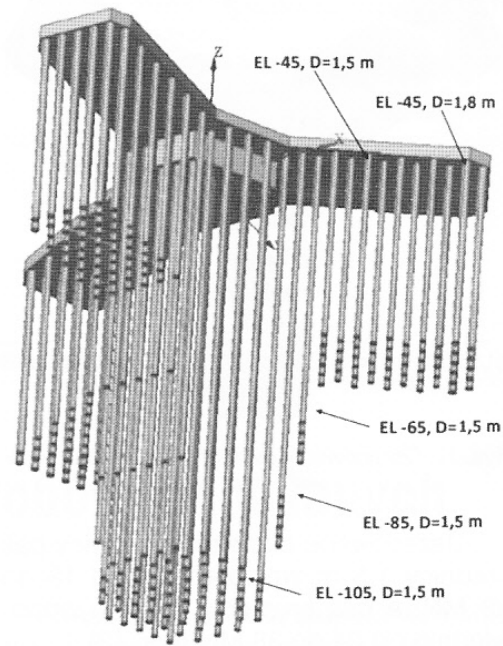
Fundamenty wieżowców projektuje się zgodnie z ogólnymi zasadami stosowanymi dla innych rodzajów budowli. Dodatkowymi zagadnieniami, jakie należy rozpoznać jest stateczność i wychylenia części nadziemnej oraz wpływ tych zjawisk na powstanie naprężeń pod fundamentem, które mają duże znaczenie na wymiarowanie odpowiednio dobranego systemu fundamentowania. Odpowiedzią na tak postawione uwarunkowania statyczne są coraz częściej stosowane fundamenty zespolone składające się z szeregu pali żelbetowych oraz z płyty fundamentowej. Zespolony układ fundamentu FPP wykorzystuje współpracę pali i płyty, a osiadanie układu traktuje się całościowo [12, 53, 81]. Przyjęcie odpowiedniej liczby oraz długości pali i baret pozwala na zmniejszenie naprężeń w płycie fundamentowej, a

w konsekwencji umożliwia ograniczenie deformacji geometrycznych obiektu. Znane są liczne przykłady, gdzie w części centralnej pod trzonem budynku występuje większa liczba pali wraz ze zwiększoną ich długością w porównaniu do pozostałych miejsc pod całym budynkiem. Pale lub baret realizowane są zazwyczaj o długości minimum 15 metrów ze względu na występowanie strefy bezpośredniego oddziaływania płyty fundamentowej na grunt. Maksymalnej długości pali lub baret nie określono w żadnych wytycznych konstrukcyjnych. Jednym z przykładów gdzie zrealizowano najdłuższe pale jest budynek Petronas Twin Towers w Malezji o wysokości 452 metrów. Wykonano tam 104 pale o długości od 60 metrów do 115 metrów.

W najwyższym ukończonym budynku świata – Burj Dubai - zastosowano 194 pale o średnicy 1,5 metra i długości 45 metrów. Podstawowym uwarunkowaniem długości pali lub baret jest poziom gruntów nośnych. Kształt najczęściej występujących baret przypomina: "T, Y, +, --, i są realizowane, jako część ścian szczelinowych budynku. Baret podobnie jak pale mają wysokie nośności sięgające wartości 30 MN [34] oraz znaczą sztywność osiową. Współpraca pali i płyty fundamentowej pozwala zmniejszyć kilkakrotnie maksymalne osiadania całego budynku. Obliczenia statyczne przy zastosowaniu MES (Metoda Elementów Skończonych) oraz pomiary realizowane na wykonanych obiektach [3] wykazały, iż pale mogą przejmować od 40% do 70% całkowitego obciążenia [34]. Część składowa fundamentu zespolonego, jaką jest płyta fundamentowa, spełnia również funkcję oczepu spinającego głowice pali lub baret zgodnie z tradycyjnymi zasadami współpracy elementów konstrukcji. Grubość elementu w zależności od indywidualnych rozwiązań technicznych mieści się w przedziale od 2,5 metra do 4 metrów. Przypadkiem nieco odmiennym od przedstawionych powyżej założeń jest płyta fundamentowa budynku Commerzbanku we Frankfurcie nad Menem o grubości od 3 metrów w części zewnętrznej obrysu obiektu, a dochodząca do 6 metrów bezpośrednio pod trzonem żelbetowym. Przykłady obrazujące kształt fundamentu zespolonego zaprezentowano na Rys. 3.4.1 a i b.



Rys. 3.4.1a Kształt fundamentu FPP  
Commerzbank we Frankfurcie  
Źródło: [89]



Rys. 3.4.1b Kształt fundamentu FPP  
Kingdom Tower w Jeddah (Arabia Saudyjska)  
Oznaczenia: EL - dł. pała, D- średnica pała  
Źródło: [91]

Problemem technologicznym przy wykonywaniu fundamentu zespolonego, a w szczególności grubej płyty, jest zabezpieczenie elementu przed uszkodzeniem wywołanym zjawiskiem skurczu mieszanki betonowej oraz wpływem wysokiej temperatury towarzyszącej procesowi wiązania. Przy płycie grubości około 2 metrów temperatura wewnątrz elementu może wynosić około 55 stopni Celsjusza [53]. Dodatkową procedurą realizacji fundamentu płytowego wieżowca jest zasada dotycząca braku stosowania dylatacji. Rozwiązaniem technicznym stosowanym dość często jest wykonanie płyty metodą „szachownicy”. Polega ona na realizacji fundamentu poprzez betonowanie mniejszych fragmentów płyty, które nie są ze sobą w początkowej fazie połączone. Po okresie dojrzewania mieszanki betonowej, przyjmowanej średnio około od 15 do 20 dni, odcinki będące przerwami pomiędzy uprzednio zabetonowanymi polami o kubaturze około 600 ÷ 800 metrów sześciennych [53], są łączone poprzez zalanie ich odpowiednio przygotowaną mieszanką betonową.

Ostatnim elementem systemu fundamentowania budynków wysokich jest ściana szczelinowa. Przy realizacji współczesnych wieżowców jest ona praktycznie zawsze integralnym składnikiem konstrukcji fundamentu oraz kondygnacji

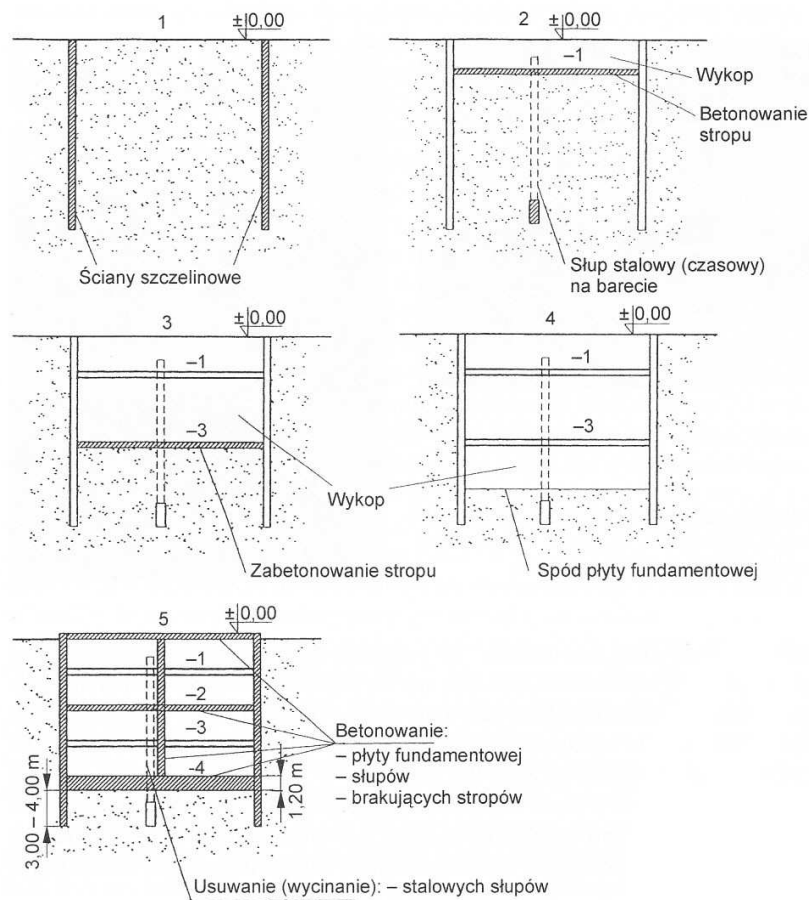
podziemnych. Podstawową jej funkcją jest ograniczenie przemieszczeń gruntu spowodowanych wykonaniem głębokiego wykopu i powiązanego z zaprojektowanymi kondygnacjami podziemnymi. Zagłębienie ścian szczelinowych do warstwy nieprzepuszczalnej wodę gruntową pozwala również na częściowe zredukowanie zjawiska zalewania wykopu. Ściany szczelinowe współpracują bezpośrednio z fundamentem oraz ze stropami kondygnacji podziemnych.

W celu realizacji fundamentu budynku wysokiego oraz kondygnacji podziemnych konieczne jest wykonanie ścian szczelinowych oraz stropów między kondygnacyjnych stosując jedną z trzech podstawowych metod wznoszenia budynków.

Metoda „**stropowa**” (Rys. 3.4.2) często określana również metodą mediolańską, ponieważ pierwszy raz została zastosowana w Mediolanie przy budowie metra. Polega na wykonaniu ścian szczelinowych do poziomu projektowanej płyty fundamentowej, następnie wykonuje się płyty stropowe niższych kondygnacji aż do poziomu płyty fundamentowej oraz pali lub baret. Konstrukcja nadziemna budynku jest realizowana dopiero po zakończeniu prac w części podziemnej.

Kolejną metodą jest „**top & down**”, która jest zbliżona do klasycznej metody stropowej, z taką różnicą, iż tutaj realizowane są równocześnie kondygnacje podziemne i nadziemne. Wybranie urobku ziemnego odbywa się za pośrednictwem pozostawionych w stropach otworów technologicznych.

Ostatnią metodą jest „**półstropowa**” zwana również tarczową lub obręczą rozpieranej. Stosowana jest przy realizacji bardzo dużych obiektów, w których stropy wykonuje się jedynie dookoła wykopu, tworząc obręcz. Stropy wspierają się identycznie, jak w dwóch wcześniej opisanych metodach, za pomocą tymczasowych słupów stalowych posadowionych na baretach lub palach. W obrysie stropów obręczowych prace wykonuje się klasycznie, a centrum realizuje się w otwartym wykopie.



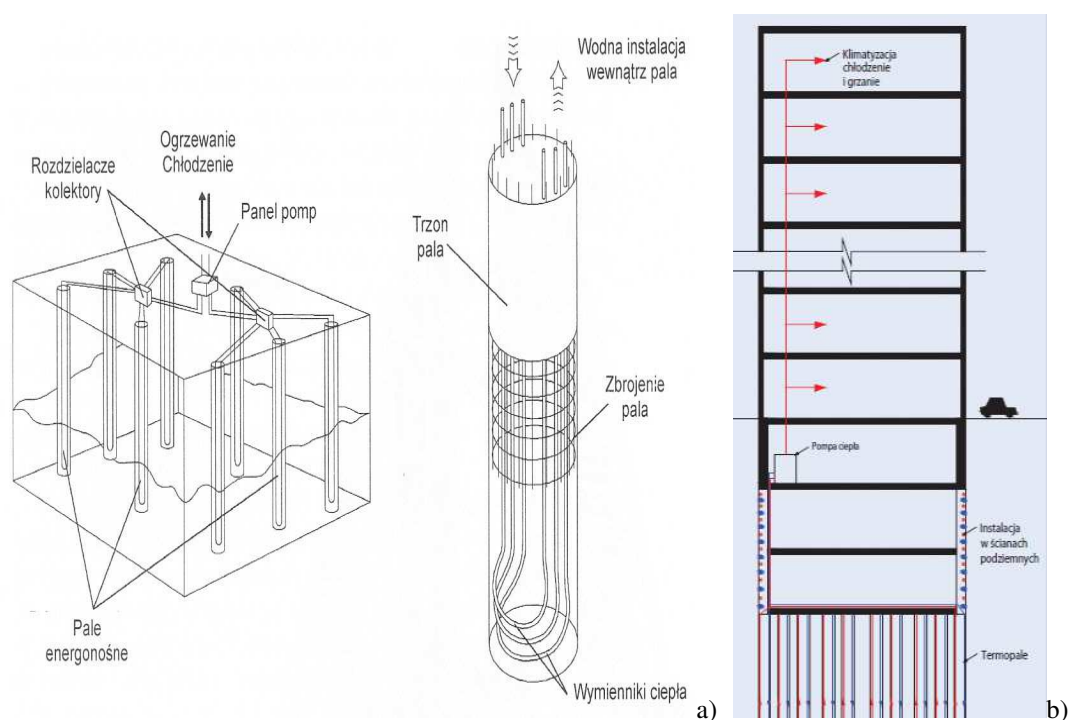
Rys. 3.4.2 Procedura wykonania kondygnacji podziemnych oraz fundamentu metodą klasyczną zwaną „stropową”  
Źródło: [53, 32]

### Krótkie podsumowanie:

Przedstawione uwarunkowania geologiczne wznoszenia budynków wysokich oraz rodzaje fundamentów nie mają bezpośredniego wpływu na kształtowanie nadziemnej formy architektonicznej oraz strukturalnych determinant wieżowców jednakże mogą się stać pomocą w realizacji postulatów "eco-tech". Obiekty posadowione na palach często wykorzystują energię geotermalną do ogrzewania budynku w zimie oraz wspomagania systemów chłodzenia w lecie. Instalacje grzewcze służące do pozyskiwania ciepła najczęściej umieszczone są w palach wierconych lub ścianach szczelinowych [65].

Ciekawymi aplikacjami rozwiązań pali z funkcjami wymiennika ciepła są budynki wysokościowe we Frankfurcie nad Menem [52] (Rys. 3.4.3 a i b). Podobne rozwiązania zastosowano w Azji w budynku Perl River w Guangzhou, który

stawiany jest w środowisku projektantów budynków wysokich za wzór aplikacji rozwiązań proekologicznych [38,53].



Rys. 3.4.3 a i b Schemat instalacji oraz kształtu termopali

Źródło: [53, 65]

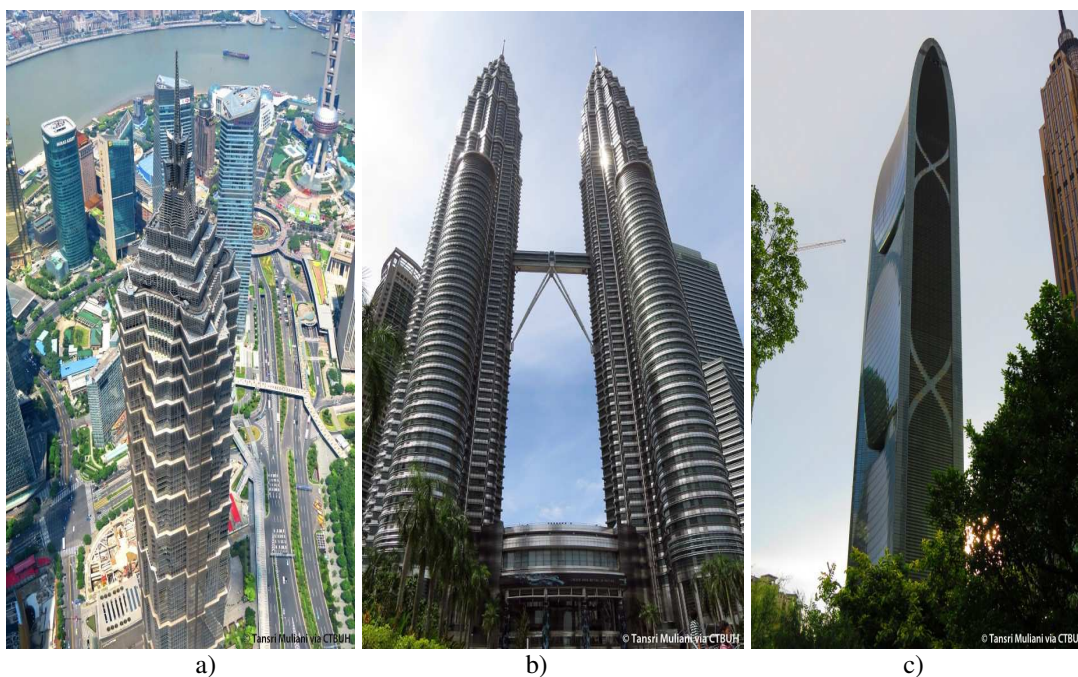
Ogólne omówienie w niniejszej rozprawie metod realizacji fundamentów jest niezbędne w celu uzupełnienia zagadnień technicznych i technologicznych składających się na skomplikowany proces projektowania i wznoszenia współczesnych budynków wysokich.

### 3.5. Uwarunkowania funkcjonalno-użytkowe lub geometryczne

Kształtowanie architektoniczne bryły wieżowca oraz projektowanie rozwiązań systemów konstrukcyjnych są procesami skomplikowanymi, związanymi z interdyscyplinarnością uwarunkowań projektowych. Pierwszym z zagadnień koherencji formy architektonicznej oraz systemu konstrukcyjnego jest podział budynku wysokiego na sekcje. Wśród podstawowych można wymienić: część nadziemną, na którą składa się wierzchołek często określany pojęciem "zwieńczenia", część centralną oraz przyziemie. Drugą znaczącą częścią wieżowca są kondygnacje podziemne, które nie mają bezpośredniego wpływu na formę elewacji wieżowca, jednakże w sposób znaczący mają wpływ na wybór ustroju

nośnego, co pośrednio będzie skutkowało w procesie kształtowania nadziemnej części bryły.

Współczesne wieżowce w zależności od ośrodka geograficznego, w którym są projektowane i realizowane, przyjmują wiele różnych kształtów wierzchołków. Zasadniczo wyróżnia się dwa rozwiązania, pierwszym jest zakończenie w postaci zwężającej się stożkowej iglicy (Rys. 3.5.1 a, b, c). Drugim rozwiązaniem są zakończenia wierzchołka zbliżone do kształtu dachu płaskiego (Rys. 3.5.2 a, b, c), choć architektura współczesnych budynków wysokich w sposób dość zasadniczy odbiega od rozwiązań stosowanych w latach 70 XX wieku. Wybór kształtu zwieńczenia wieżowca jest często podyktowany wieloma różnymi powodami, wśród najważniejszych można wymienić: uzyskanie najwyższej wysokości budynku, wpływ religii i kultury lokalnej, szczególnie dotyczy obiektów projektowanych w Azji i na Bliskim Wschodzie, uzyskanie efektu wzrokowego wysmuklenia bryły oraz pokazanie potęgi politycznej lub finansowej inwestora.



a) b) c)  
Rys. 3.5.1 a, b, c Strzeliste zakończenia wierzchołków wieżowców  
(a) - Jin Mao Tower, (b) - Petronas Tower, (c) - Pearl River Tower

Źródło: [i1]



a)

b)

c)

Rys. 3.5.2 a, b, c Płaskie zakończenia wierzchołków wieżowców

(a) - One World Trade Center, (b) - Capital City Moscow Tower, (c) - Kingdom Center

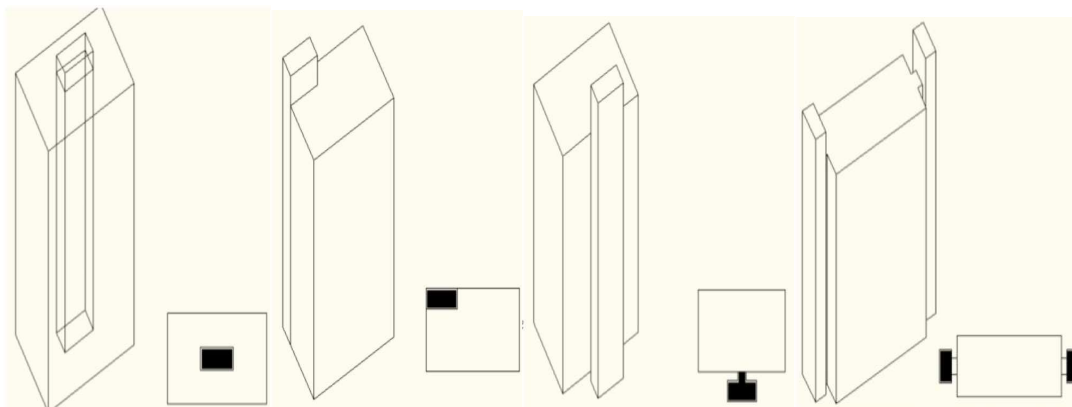
Źródło: [i1]

Część centralna budynku wysokiego kształtowana jest przy uwzględnieniu rozwiązań technicznych związanych z przyjętym systemem konstrukcyjnym. W zaprojektowanych budynkach o klasycznym ustroju trzonowym lub w jego licznych modyfikacjach<sup>9</sup> istotne znaczenie ma trzon. Lokalizacja na rzucie (Rys. 3.5.3) oraz kształt samego trzonu (Rys. 3.5.4) może mieć decydujące znaczenie w procesie ostatecznego kształtowania formy bryły budynku wysokiego. Preferowanym rozwiązaniem jest umiejscowienie trzonu wraz z zespołem wind służących do komunikacji pionowej w części centralnej. Pod względem architektonicznym spowoduje to odsunięcie funkcji użytkowych poszczególnych kondygnacji od środka w stronę krawędzi obiektu. Wielkość powierzchni określona w procentach (Rys. 3.5.5) względem całego rzutu budynku będzie istotnym wskaźnikiem określającym jego funkcjonalność, a ponadto ekonomiczność rozwiązania [53], oraz podatność budynku na oddziaływania zewnętrzne, który definiuje sztywność przestrzenną. Badania [53] wykazały, iż powierzchnia trzonów wynosi zazwyczaj od 16% do 25% całkowitej powierzchni kondygnacji typowej. W zakresie

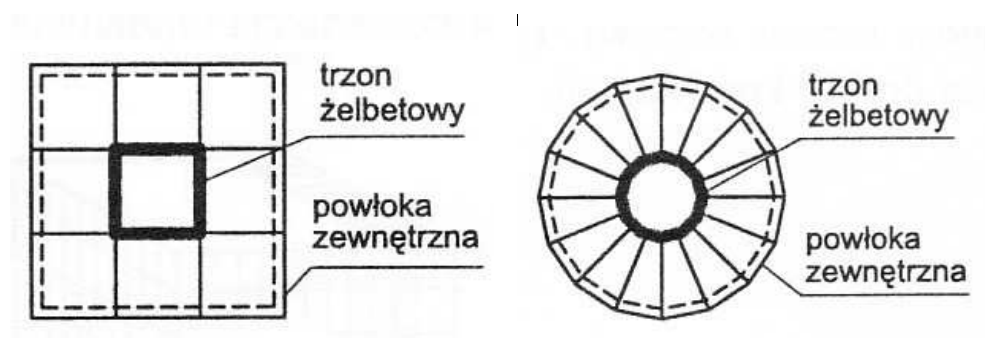
<sup>9</sup> Systemy konstrukcyjne wraz z zachodzącymi relacjami związanymi z formą architektoniczną przedstawiono szczegółowo w rozdziale 4



szywności przestrzennej budynku centralnie umieszczony trzon pozwoli na ograniczenie geometrycznych zmian obiektu wynikających ze zjawisk skrętnych [32,80,90] - momentu skręcającego wywołanego niesymetrycznością rozwiązań projektowych trzonu.



Rys. 3.5.3 Repräsentatywna lokalizacja wewnętrznych trzonów względem planu poziomego budynku  
Źródło: [i23 - autor Meer Musabber Ali]



Rys. 3.5.4 Repräsentatywne kształty wewnętrznego trzonu budynku wysokiego  
Źródło: [79,80]

Tabela 1 Zależności zachodzące pomiędzy wysokością budynku a powierzchnią rzutu trzonu kondygnacji typowej

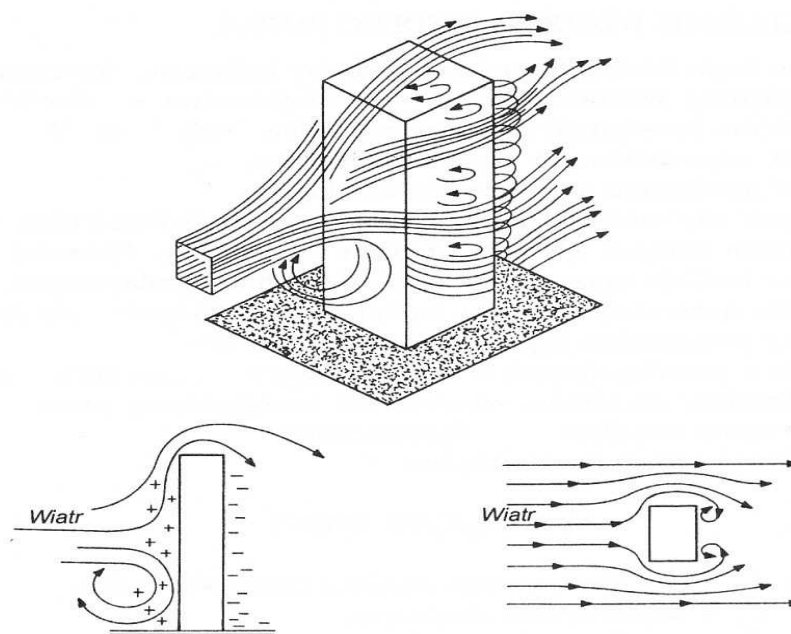
Źródło: [ Dane zaczerpnięte z publikacji 53]

WYSOKOŚĆ BUDYNKU	POWIERZCHNIA RZUTU TRZONU
DO 150 METRÓW	16,4%
150 - 200 METRÓW	18,5%
200 - 250 METRÓW	22,7%
250 - 300 METRÓW	23,6%
300 -400 METRÓW	24,9%

Przyziemie wieżowca często określane jako "podstawa", którego forma oraz sposób wyodrębnienia są podyktowane wymogami architektonicznymi oraz

konstrukcyjnymi. Wśród najważniejszych o charakterze architektonicznym należą wymogi związane z przyjętymi rozwiązaniami funkcjonalnymi parteru, gdzie najczęściej umieszcza się najbardziej reprezentatywne najwyższe hole oraz dąży się do otwarcia kondygnacji parteru na otoczenie. Kolejnym uwarunkowaniem architektonicznym jest wpływ relacji zachodzącej z otoczeniem, a w szczególności charakteru i wielkości istniejącej zabudowy.

W zakresie zagadnień konstrukcyjnych, a w szczególności zjawisk aerodynamicznych w przyziemiu obiektu ma znaczenie kierunek opływających mas powietrza. Od strony nawietrznej masy powietrza wywołane wpływem parcia wiatru opadają w dół, (Rys. 3.5.5) powodując powstanie silnych zawirowań [32, 53], które mogą być niebezpieczne dla przechodniów oraz całej infrastruktury technicznej a także roślinnej w najbliższym otoczeniu wieżowca.



Rys. 3.5.5 Przepływ wiatru przy ścianach budynku

Źródło: [32]

W budynkach wysokich o wysokości do 150 metrów zazwyczaj unika się projektowania funkcji technicznych na kondygnacjach pośrednich [53]. Najczęściej lokalizuje się je w partii podziemnej budynku, jako najbardziej logiczne rozwiązanie funkcjonalno-architektoniczne. Kształtowanie części podziemnej budynku wysokiego nie ma bezpośredniego wpływu na zaprojektowaną formę nadziemną,

jednakże przyjęte rozwiązania na kondygnacjach poniżej poziomu terenu w sposób pośredni będą wpływać na przyjęte podziały funkcjonalno – użytkowe oraz rodzaj systemu konstrukcyjnego. Możliwość kształtowania znacznej liczby kondygnacji podziemnych wynika w szczególności z warunków geologicznych występujących na danym terenie oraz niezbędnych wymagań funkcjonalnych postawionych przez inwestorów. Wśród zrealizowanych wieżowców największą grupę stanowią obiekty posiadające od 2 do 4 kondygnacji podziemnych [12,53,65]. Głęboka część podziemna wieżowca nie jest regułą.

W zaprojektowanych budynkach wysokich, gdzie występuje znaczna liczba kondygnacji w relacji do kondygnacji nadziemnych, jest budynek La Societe Generale w Paryżu posiadający 40 pięter nadziemnych i aż 10 pięter podziemnych. W budynku Highcliff w Hongkongu o wysokości 252 metrów i zawierającego 73 kondygnacje nadziemne, zaprojektowano 7 pięter pod ziemią. Wśród najbardziej rozpoznawalnych budynków wysokich na świecie, jest Taipei 101 na Tajwanie, gdzie zaprojektowano tylko 5 kondygnacji podziemnych przy 101 piętrach nadziemnych. W budynku Petronas Tower w Malezji jest 5 kondygnacji podziemnych przy 88 piętrach nadziemnych.

Własne analizy wskazały, iż w kształtowaniu kondygnacji podziemnych trudno jest wyróżnić jedną dominującą zależność techniczną lub projektową.

### **Krótkie podsumowanie:**

Uwarunkowania projektowe przedstawione w niniejszym podrozdziale wskazują na złożoność procesów zachodzących pomiędzy czynnikami architektonicznymi kształtującymi bryłę i formę wieżowca a uwarunkowaniami stosowania odpowiednich rozwiązań technicznych. Proces projektowania wieżowca jest zadaniem interdyscyplinarnym, które wymaga wiedzy z wielu obszarów wiedzy technicznej. Przedstawione zagadnienia w niniejszym podrozdziale pomagają w zrozumieniu obecnych trendów pojawiających się w projektowaniu współczesnych budynków wysokich i ich strukturalnych determinant.

### 3.6. Uwarunkowania materiałowe

Postawione na początku niniejszej dysertacji hipotezy nieodłącznie związane są z analizą uwarunkowań projektowych o charakterze konstrukcyjnym i architektonicznym oraz wzajemnych relacji zachodzących między nimi. Do podstawowych zagadnień technicznych, które mają istotny wpływ na wyjaśnienie złożonych ich relacji jest omówienie ewolucji własności materiałów budowlanych, z jakich jest projektowany główny system konstrukcyjnych budynków wysokich w aspekcie kształtowania nowoczesnych form architektonicznych budynków wysokich. Do podstawowych materiałów budowlanych można zaliczyć stal, żelbet wraz ze zmodyfikowanymi rozwiązaniami w postaci ustrojów mieszanych żelbetowo-stalowych oraz układów kompozytowych. Konstrukcje drewniane zostaną celowo pominięte w niniejszej analizie ze względu na znaczne ograniczenia właściwości mechanicznych drewna, które obecnie nie pozwalają na precyzyjne porównanie strukturalnych determinant z obiektami będących w zakresie przyjętej analizy.

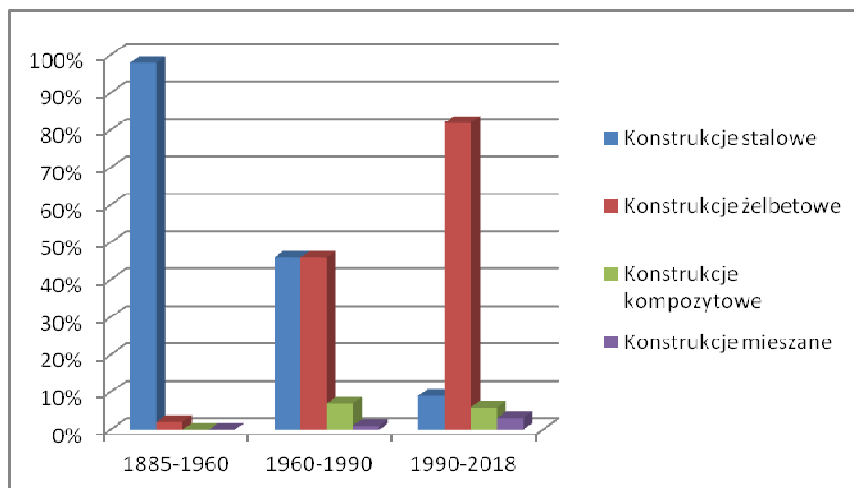
Wśród ukończonych do końca 2018 roku obiektów warto jednak wspomnieć o pięciu budynkach, które mogą stać się podstawą do upowszechniania w przyszłości konstrukcji drewnianych w budownictwie wysokim. Są to budynki o nazwie Treet w Bergen o wysokości 49 metrów, 25 King w Brisbane o wysokości 46 metrów, Origine w Quebec o wysokości 41 metrów, Forte w Melbourne o wysokości 32 metrów i Stadthaus w Londynie o wysokości 29 metrów. Zagadnienia techniczne, jakie powinny zostać rozwiązane przy próbach zastosowania drewna, jako materiału konstrukcyjnego budynku wysokiego to właściwości związane z ognioodpornością oraz uzyskanie sztywności przestrzennej niezbędnej przy występowaniu znacznych obciążeń poziomych działających na obiekt wysokościowy.

Rozwój techniki oraz technologii materiałowej zapewne już, w niedalekiej przyszłości pozwoli na rozwój systemów drewnianych wspieranych przez konstrukcje żelbetowe lub stalowe. Jest to prawdopodobnie jedyne rozwiązanie technologiczne, jakie umożliwi stosowanie drewna w konstrukcji budynków wysokich.

Pomijając celowo w tym rozdziale okresy starożytne, w których dominowały rozwiązania murowane, początek budownictwa wysokiego związany jest z upowszechnieniem żeliwa, a następnie stali w systemach konstrukcyjnych.

Dobór obiektów o wysokości powyżej 100 metrów do poniższych analiz wynikał z dążenia do zwiększenia liczebności próby badawczej i uzyskania możliwie jak najmniejszego błędu statystycznego. Umowny podział na trzy okresy badawcze wynikał z istotnych zmian, jakie zaszły w rozwoju budownictwa wysokiego. Rok 1885 to ukończenie ikonicznego pierwszego współczesnego wieżowca The Home Insurance Buildig. Lata 60 XX wieku to okres, w którym upowszechnia się idea powłoki konstrukcyjnej według założeń znanego konstruktora Falzura Khana. Koniec XX wieku to czas realizacji obiektów, które przeszły do historii budownictwa wysokiego jako ikony, które wskazują przyjęty trend projektowy w obecnie realizowanych wieżowcach.

Konstrukcje stalowe odegrały kluczową rolę w rozwoju cywilizacyjnym ostatnich dwóch stuleci [4] i ich przydatność w budynkach wysokich jest wciąż nieodzowna. Kolebką wieżowców jest Ameryka Północna, gdzie dominacja konstrukcji stalowych była widoczna w pierwszym okresie realizacji budynków wysokich obejmujących pomiędzy rokiem 1885 a 1960, jak również z drugim okresie czasowym przyjętym umownie w rozprawie pomiędzy rokiem 1960 a 1990. Udział procentowy realizowanych obiektów o konstrukcji stalowych na rzecz ustrój żelbetowych oraz kompozytowych znacznie zmniejszył się w ostatnich trzech dekadach. Potwierdzeniem postawionej tezy jest poniżej zamieszczony diagram (Rys. 3.6.1) przedstawiający udział konstrukcji stalowych w realizowanych wieżowcach o wysokości powyżej 100 metrów w odniesieniu do wszystkich wzniesionych obiektów wysokościowych w Ameryce Północnej.



Rys. 3.6.1 Udział konstrukcji stalowych w ogólnej liczbie budynków wysokich powyżej 100 metrów realizowanych w Ameryce Północnej

Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]

Wzrost wysokości budynków wraz z ewolucją form geometrycznych wieżowców to wyzwanie dla projektantów współczesnych systemów konstrukcyjnych oraz zespołów opracowujących nowe rodzaje materiałów konstrukcyjnych i nowatorskie metody ich praktycznych zastosowań [52]. Rozwój technologii betonu sprawił, że przy obecnych realizacjach budynków wysokich konstrukcje żelbetowe są coraz bardziej preferowane względem stosowania konstrukcji stalowych [53, 79].

Decydującymi czynnikami skłaniającymi do wyboru konstrukcji monolitycznej jest wysoka wytrzymałość betonu, trwałość wynikająca z odporności na ogień i korozję, lepsze tłumienie drgań, krótsze okresy realizacji elementów przy wykorzystywaniu szalunków przesuwanych, możliwe stosowanie domieszek do betonu oraz właściwości technologiczne związane z łączeniem z praktycznie każdym innym materiałem budowlanym.

Z analizy danych statystycznych dotyczących listy 100 najwyższych budynków świata ukończonych do końca 2018 roku wynika, iż budynków o konstrukcji żelbetowej było 30, w systemie kompozytowym traktowanym, jako konstrukcja zespolona było 57, 4 wieżowce wybudowano w systemie mieszanym żelbetowo - stalowym, a w ustroju nośnym stalowym zrealizowano jedynie 9.

Obecnie najwyższymi budynkami na świecie wykonanymi w konstrukcji żelbetowej jest Marina 101 o wysokości 425 metrów wybudowany w Dubaju w roku 2017 oraz 432 Park Avenue również o wysokości 425 metrów zlokalizowany w

Nowym Jorku, który został ukończony w 2015 roku. Wśród najwyższych budynków wykonanych w konstrukcji stalowej wciąż zaszczytne miejsce zajmuje Willis Tower<sup>10</sup> w Chicago o wysokości 442 metrów, który został ukończony w 1974 roku.

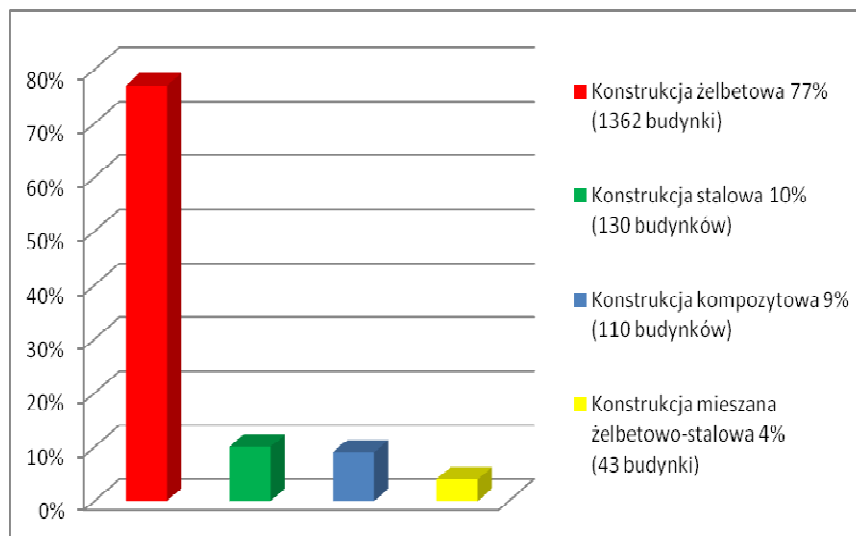
W 2015 roku w Shanghaju został ukończony najwyższy budynek w konstrukcji kompozytowej o nazwie Shanghai Tower o wysokości 632 metrów. Najwyższym wieżowcem o ustroju nośnym mieszanym żelbetowo-stalowym, a zarazem od 2010 roku najwyższym budynkiem świata, jest Burj Kalifa o wysokości 828 metrów wybudowany w Dubaju.

Interesujące dane statystyczne, które w miarę precyzyjnie opisują współczesne tendencje projektowe budynków wysokich w ostatnich trzech dekadach we wszystkich ośrodkach geograficznych, w których obserwujemy znaczący wzrost budownictwa wysokiego przedstawiają, poniżej diagramy rysunkowe (Rys. 3.6.2 a, b, Rys. 3.6.3 oraz Rys. 3.6.4).

W pierwszym ośrodku geograficznym obejmującym Amerykę Północą oraz Australię wśród budynków powyżej 100 metrów wysokości wzniesionych pomiędzy latami 90. ubiegłego stulecia a 2018 dominują konstrukcje żelbetowe wraz z różnymi modyfikacjami. Najwyższym budynkiem wybudowanym w USA w analizowanym okresie jest One World Trade Center o wysokości 541 metrów, którego główna konstrukcja nośna została zrealizowana jako kompozytowa. W Ameryce Północnej będącej kolebką wieżowców, gdzie pierwsze wieżowce były budowane ze stali, najwyższym budynkiem wybudowanym w systemie konstrukcyjny stalowym jest New York Times Tower o wysokości 318 metrów ukończony w 2007 roku. W Australii najwyższym budynkiem wybudowanym w badanym okresie to Q1 Tower o wysokości 322 metrów wykonany w konstrukcji żelbetowej.

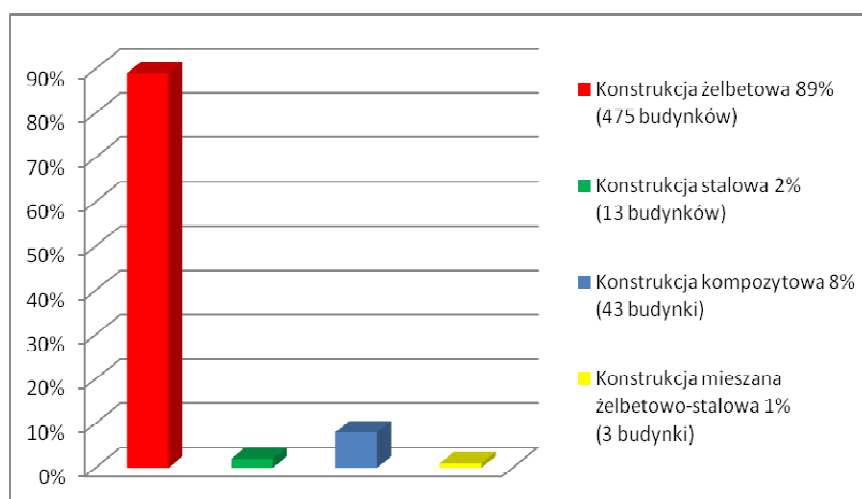
---

<sup>10</sup> Poprzednia nazwa budynku to Sears Tower



Rys. 3.6.2 a Udział procentowy zastosowanych materiałów budowlanych ustroju nośnego budynków wysokich powyżej 100 metrów w USA i Australii  
 Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]

Drugim obszarem geograficznym, w którym obserwowany jest znaczący udział budownictwa wysokiego jest Europa wraz z Rosją. Najwyższym obiektem w analizowanym obszarze jest wybudowany w 2016 roku w Moskwie Federation Tower o wysokości 373 metrów przy zastosowaniu konstrukcji żelbetowej. W Europie wyraźna jest tendencja w projektowaniu budynków wysokich głównie przy zastosowaniu konstrukcji żelbetowych, udział ustrojów stalowych jest niewielki.



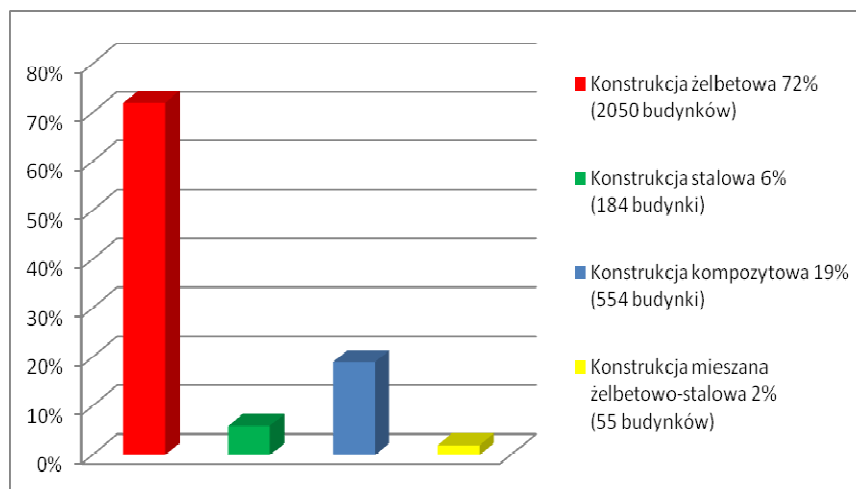
Rys. 3.6.2 b Udział procentowy zastosowanych materiałów budowlanych ustroju nośnego budynków wysokich powyżej 100 metrów w Europie  
 Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]



Ostatnim obszarem geograficznym ujętym w analizie niniejszej rozprawy jest Azja i Bliski Wschód. Dynamika budowania na tym obszarze budynków wysokich jest największa odnosząc się do skali światowej. Istotnymi cechami badanego obszaru geograficznego i geopolitycznego jest realizacja budynków związanych ze współczesnym trendem, jakim jest bicie kolejnych rekordów wysokości. Ukończone budynki na przedmiotowym obszarze geograficznym mają znacznie większą wysokość niż w pozostałych dwóch analizowanych ośrodkach.

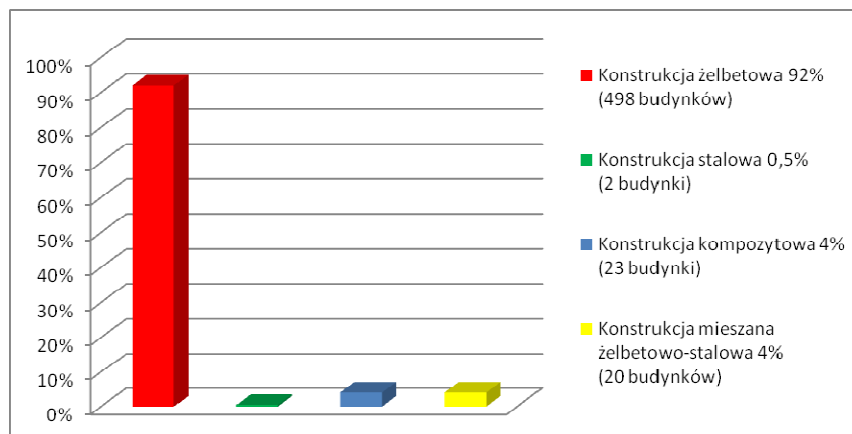
Najwyższym budynkiem w Azji jest Shanghai Tower o wysokości 632 metrów wybudowany w 2015 roku przy zastosowaniu ustroju kompozytowego.

Na Bliskim Wschodzie w Dubaju wybudowano najwyższy budynek na świecie o nazwie Burj Khalifa o wysokości 828 metrów w systemie mieszanym żelbetowo-stalowym. Celem przybliżenia zjawiska dynamiki budowania wieżowców na tym obszarze, zostanie on dodatkowo rozdzielony indywidualnie na osobne podobszary: Azji (Rys. 3.6.3) oraz Bliskiego Wschodu (Rys. 3.6.4).



Rys. 3.6.3 Udział procentowy zastosowanych materiałów budowlanych ustroju nośnego budynków wysokich powyżej 100 metrów w Azji

Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]

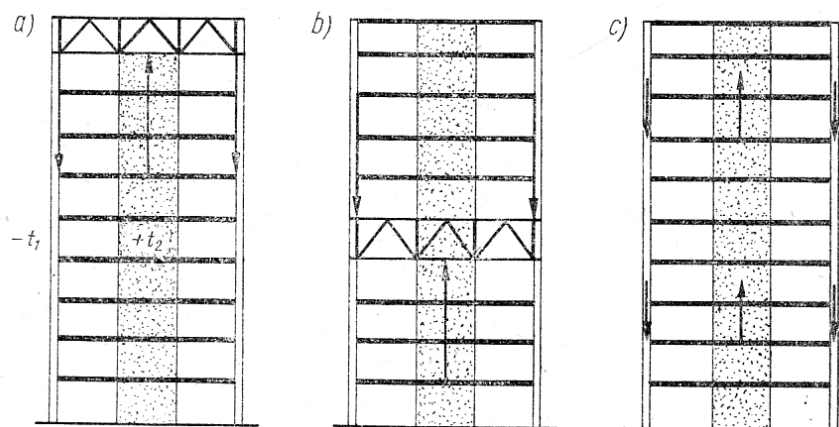


Rys. 3.6.4 Udział procentowy zastosowanych materiałów budowlanych ustroju nośnego budynków wysokich powyżej 100 metrów na Bliskim Wschodzie  
 Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z 11]

Istotnym zagadnieniem technologicznym, które pozwala rozpoznać przyczyny obecnego trendu projektowego dotyczącego stosowania konstrukcji żelbetowych, mieszanych oraz kompozytowych, jest wpływ zmian temperatury wzdłuż wysokości obiektu. Uwzględnienie wpływu temperatury na elementy układu konstrukcyjnego oraz ścian osłonowych [79] ma szczególne znaczenie dla obiektów projektowanych w krajach, gdzie występują wysokie zmiany temperatur dobowych, szczególnie widoczne jest to w krajach Bliskiego Wschodu takich jak np. Arabia Saudyjska oraz Zjednoczone Emiraty Arabskie. Zjawisko rozszerzalności termicznej stali jest jednym z podstawowych przyczyn rezygnacji z tego rodzaju materiału konstrukcyjnego w krajach Bliskiego Wschodu [52], co potwierdza zamieszczony powyżej diagram (Rys. 3.6.3 oraz Rys. 3.6.4).

Budynki wysokie narażone są na działanie wpływów termicznych związanych z różnicą temperatury mierzoną na różnych wysokościach oraz zmieniającą się w ciągu dnia (Rys. 3.6.5). W elementach rozciąganych lub ściskanych takich jak słupy oraz wieszaki powstają dodatkowe siły a w elementach zginanych pojawiają się zwiększone momenty zginające. Momenty i siły utworzone poprzez zjawiska termiczne mogą doprowadzić do wyczerpania nośności poszczególnych elementów nośnych lub powstania uszkodzeń konstrukcyjnych [79]. Zagadnienia wpływu temperatury jest często pomijane dla obiektów niższych do 15 kondygnacji [79], gdyż nie obserwuje się znaczącego zwiększenia sił wewnętrznych powodujących odkształcenia. Przy projektowaniu wieżowca mającego więcej niż 25 kondygnacji nadziemnych powinno się przeprowadzić szczegółową analizę

określającą skalę wpływu na ustrój nośny. Zredukowanie wpływu zmiany temperatury na elementy nośne w ramach zagadnień konstrukcyjnych często jest realizowane poprzez wprowadzenie dylatacji na wysokości budynku lub stosowanie połączeń przegubowych.

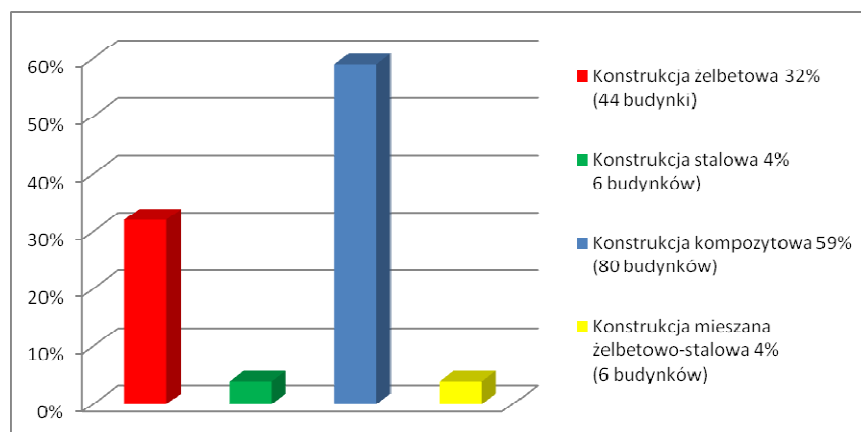


Rys. 3.6.5 Generowane siły wewnętrzne w trzonie i słupach wywołane wpływem temperatury  
a) budynki wieszarowe, b) budynki trzonowo-dźwigarowe, c) ustrój powłokowy  
Źródło: [79]

Dopełnieniem przeprowadzonych analiz i przygotowania stosownych wniosków w końcowym podsumowaniu konieczne jest przedstawienie zależności statystycznych użyczenia różnych materiałów budowlanych w systemach konstrukcyjnych budynków o wysokości powyżej 300 metrów oraz powyżej 600 metrów. Nadrzędnym celem niniejszej rozprawy jest dążenie do unikania prowadzenia analiz nie tylko dla obiektów najwyższych w skali globalnej, lecz także dla szerszej grupy budynków bardzo wysokich. Aby rozpoznać i zdefiniować charakterystyki współczesnych tendencji projektowych konieczne jest odniesienie uzyskanych wyników względem cech mierzalnych, a nie subiektywnych. Światowy Komitet Budynków Wysokich CTBUH, jak dotychczas konsekwentnie i celowo w definicji budynku wysokiego pomija określenie związane z wysokością.

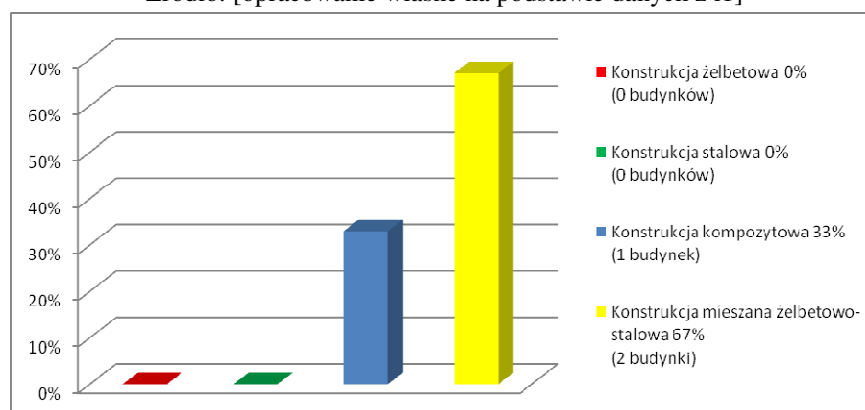
W ostatnich dwóch dekadach coraz częściej w publikacjach światowych pojawiają się dwie nowe definicje. Pierwszą jest pojęcie super wysokich budynków o wysokości powyżej 300 metrów (ang: supertall) oraz mega wysokich o wysokości powyżej 600 metrów (ang: megatall). Poniższe analizy zgodnie z uprzednio przyjętymi założeniami podstawowymi obejmują ostatnie trzy dekady tj. od 1990 roku do końca 2018 roku oraz nieco szerzej do roku 2020. Dla obiektów o

wysokości powyżej 300 metrów dominującymi rozwiązaniami materiałowymi są konstrukcje żelbetowe oraz kompozytowe (Rys. 3.6.6). W przypadku niewielkiej liczby wieżowców, jaka obecnie została zrealizowana powyżej wysokości 600 metrów, zastosowano rozwiązania kompozytowe w jednym budynku oraz mieszane żelbetowo-stalowe w dwóch budynkach. (Rys. 3.6.7).



Rys. 3.6.6 Udział procentowy zastosowanych materiałów budowlanych ustroju nośnego budynków wysokich powyżej 300 metrów

Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]



Rys. 3.6.7 Udział procentowy zastosowanych materiałów budowlanych ustroju nośnego budynków wysokich powyżej 600 metrów

Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]

### Krótkie podsumowanie:

Dominacja konstrukcji budynków wysokich wybudowanych przy zastosowaniu żelbetu jest widoczna we wszystkich ośrodkach geopolitycznych na świecie. Właściwości nowoczesnych systemów konstrukcyjnych wykonanych za pomocą żelbetu pozwalają na uzyskanie wysokiej odporności przeciwpożarowej oraz umożliwiają znaczne ograniczenie drgań własnych wywołanych zewnętrznym

obciążeniem w postaci oddziaływań wiatru oraz sił spowodowanych trzęsieniami ziemi. Rozwój techniki związanej z przemieszczaniem pionowo mieszanki betonowej na budowie oraz technologii samej mieszanki betonowej umożliwił realizację najwyższych budynków świata.

Obecnie obowiązującym standardem technicznym przy realizacji wieżowców jest stosowanie wysokich klas betonu charakteryzujących się parametrami wytrzymałości na ściskanie przekraczającymi wartości 90 MPa. W budynku Burj Khalifa specjalnie przygotowana mieszanka betonowa została podawana na wysokość powyżej 600 metrów bez znaczącej utraty konsystencji materiału.

Przewagą konstrukcji żelbetowych lub współczesnych ustrojów kompozytowych jest zwiększona odporność na zmiany geometryczne wynikające z różnicy temperatur wzdłuż wysokości wieżowca. W budynku One World Trade Tower<sup>11</sup> w Nowym Jorku o wysokości 541 metrów zastosowano tzw. inteligentną mieszankę betonową wyprodukowaną przez firmę iCrete. Według danych technicznych przedstawionych przez inżynierów, zastosowana mieszanka odznacza się szybszym procesem wiązania i uzyskania pożądaných wytrzymałości w krótszym czasie oraz wymaga około 30%÷40% [52] mniej cementu niż tradycyjna receptura materiałowa.

Ewolucja materiałowa w systemach konstrukcyjnych będzie w najbliższych latach ukierunkowana poprzez realizację postulatów projektowych związanych z ochroną środowiska tzw. rozwiązań „eco-tech”, aplikowanych we współczesnych budynkach wysokich. Pojęcie zrównoważonego rozwoju w przypadku budynków wysokich będzie odnosić się szczególnie do stosowania materiałów z odzysku - recyklingu, ograniczenia zużycia energii pochodzącej ze źródeł kopalnianych w celu wytworzenia wymaganego materiału budowlanego oraz zmniejszenia ingerencji w środowisko naturalne.

### **3.7. Uwarunkowania wynikające z oddziaływania obciążeń zewnętrznych**

Na każdy obiekt, a tym bardziej budynek wysoki, działa zespół sił o znacznych wartościach obliczeniowych. Zaprojektowane elementy ustroju nośnego

---

<sup>11</sup> Inna nazwa budynku to Freedom Tower

budynku wysokiego muszą spełniać podstawowe kryteria związane z teorią konstrukcji, takie jak sztywność, stateczność, wytrzymałość i trwałość [79]. Nieodłącznie z tymi zagadnieniami konstrukcyjnymi wiążą się trudności w kształtowaniu nowatorskich form architektonicznych. Wraz ze wzrostem wysokości obiektu pojęcie sztywności przestrzennej budynku ekstremalnego staje się jednym z ważniejszych zagadnień konstrukcyjnych obiektu wysokościowego. Miarą sztywności budynku wysokiego jest wielkość maksymalnego względnego wychylenia wierzchołka „ $f$ ”. Zależność została opisana poprzez wskaźnik wychylenia (ang.: drift index) [91], zdefiniowany, jako miara maksymalnego przemieszczenia na szczycie budynku do jego całkowitej wysokości. Ograniczenie zjawiska znacznego wychylenia jest często rozwiązywanym zagadnieniem przy projektowaniu obiektów bardzo wysokich (ang: super tall), do których można zaliczyć obiekty o wysokości powyżej 300 metrów<sup>12</sup>. Zwiększenie sztywności przestrzennej budynku powoduje zmniejszenie wielkości przyspieszeń towarzyszących przemieszczeniom poziomym budynku wysokiego oraz przyczynia się do zwiększenia częstotliwości podstawowych drgań własnych konstrukcji, które to przy wartościach bardzo niskich mogą stwarzać zagrożenie dla bezpieczeństwa konstrukcji [15]. Dokonane porównania klasycznego obiektu wysokiego względem obiektu o sztywnym układzie przestrzennym wskazują, iż ten drugi ma większą częstość drgań własnych [79]. Na etapie projektowania koncepcyjnego określa się przybliżone wartości wychylenia wierzchołka wieżowca pod wpływem zadanego obciążenia [53]. Ograniczenie przemieszczeń poziomych jest niezbędne dla bezpieczeństwa konstrukcji, ale również i komfortu użytkowania. W przypadku prostego porównania budynku wysokiego rozważanego w zagadnieniach statyki i wytrzymałości materiałów do wspornika utwierdzonego w fundamencie o długości odpowiadającej wysokości budynku, uzyskamy ciekawe zależności. Dwukrotnie zwiększona wysokość obiektu przy zachowaniu stałego przekroju poprzecznego budynku i jego konstrukcji, spowoduje dwukrotne zwiększenie naprężeń w elementach konstrukcyjnych u podstawy od obciążeń pionowych, naprężenia od parcia wiatru zwiększą się czterokrotnie, a przemieszczenia aż szesnastokrotnie [91].

Wybitny konstruktor i twórca systemów powłokowych budynków wysokich

---

<sup>12</sup> Uwzględnienie wysokości obiektu w klasyfikacji budynków wysokich zostało wprowadzone przez CTBUH dopiero w ostatnich dwóch dekadach

Fazlur Khan uznawał, iż oprócz wychylenia wierzchołka niebezpieczne dla wieżowca mogą być ruchy skrętne konstrukcji nośnej [59]. Opisane wyniki badań wskazują w sposób jednoznaczny na potrzebę zapewnienia odpowiedniej sztywności przestrzennej budynku wysokościowego. Ograniczenia wskaźnika wychylenia względnego [91] stosowane w różnych ośrodkach geograficznych zawiera się w przedziale od 0,001 do 0,005. W obiektach, w których ulokowano funkcję hotelową i mieszkalną wartości powinny być mniejsze od tych, które przyjmuje się przy budynkach biurowych. Po analizie wielokryterialnej można wyciągnąć wnioski, iż uwarunkowania projektowe będą zależały od dopuszczalnych wartości akceptowanych przez organizm ludzki. W Stanach Zjednoczonych, które były prekursorem budownictwa wysokiego, przyjmuje się wychylenia wierzchołka wieżowca według zależności [53]:

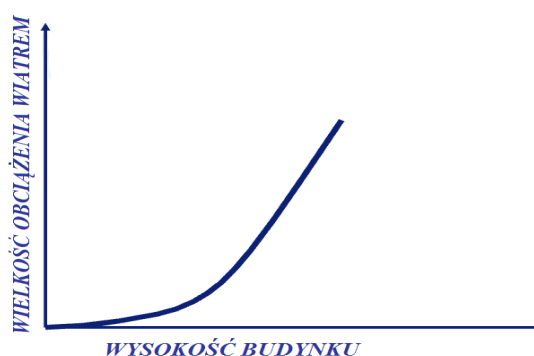
$$f=H/500,$$

gdzie: **f** oznacza wychylenie wierzchołka budynku, a **H** to wysokość tego budynku

Przeprowadzone badania tunelowe budynków wykazały, iż podana zależność jest prawidłowa dla konstrukcji stalowych. Przy realizacji konstrukcji żelbetowej można dopuścić wychylenia mniejsze o 10-15% [53,79]. Brak jest szczegółowych wytycznych opartych na ogólnodostępnych badaniach dotyczących przypadków realizacji wieżowców o konstrukcjach mieszanych lub kompozytowych w odniesieniu do zjawiska wychylenia wierzchołka. Jednakże oba rozwiązania materiałowe są najczęściej stosowane w najwyższych obiektach na świecie, w których opisywane zjawisko wychyleń wierzchołka musiało zostać ograniczone do wartości akceptowalnych dla obiektów mieszkalnych i hotelowych. W ostatnich latach widoczny jest trend projektowy, aby maksymalne wychylenia zredukować do wartości wynoszącej  $f=H/750\div 1200$ , dzięki czemu uzyskuje się większy komfort użytkowania budynku. Zmniejszone wartości wychyleń wierzchołka budynku związane są z odpowiednio dobraną statecznością przestrzenna obiektu wynikającą z analiz przepływu wiatru w badaniach tunelowych oraz poznanych uwarunkowań projektowych na podstawie wyników badań na rzeczywistym wieżowcu [3]. Wraz z ograniczeniem maksymalnych wychyleń od pionu, spowodowanych oddziaływaniami zewnętrznymi, ważne stało się zmniejszenie gwałtowności ich wychyleń, zwanych potocznie „szarpaniem” budynku. Obecnie obowiązujące

zalecenia dotyczące maksymalnego wychylenia wierzchołka i jego gwałtownych przyspieszeń wynoszą w granicach od **1%g** do **3%g**, gdzie „g” oznacza przyspieszenie ziemskie [53]. Przedstawione wymogi technologiczne preferują wykorzystanie konstrukcji żelbetowych do realizacji wieżowców najwyższych, których pierwotna sztywność będzie większa niż w konstrukcji stalowej. Lepsze wyniki tłumienia drgań własnych wykazują obiekty o układach konstrukcyjnych zwartych i wykonanych z betonu/żelbetu [79].

Podawane w normach branżowych różnych krajów wielkości obciążeń działających na budynki, niekoniecznie odpowiadają wartościom, jakie należy przyjmować w obliczeniach statycznych dotyczących obiektów wysokościowych. Niedokładność wartości charakterystycznych ujętych w normach można zweryfikować i skorygować na podstawie badań tunelowych lub pomiarów na rzeczywistym obiekcie [3]. Skorelowanie zależności pomiędzy wysokością wieżowca, a wartościami oddziaływań zewnętrznych przedstawia wykres (Rys. 3.7.1) [29,50]. W całym układzie sił zewnętrznych działających na budynek wysoki najistotniejszym obciążeniem są oddziaływania poziome wywołane wiatrem, których wielkości w sposób logarytmiczny zwiększają się wraz z wysokością obiektu oraz siły sejsmiczne, których spektrum oddziaływania nie można sklasyfikować identyczną zależnością, ze względu na złożoność zagadnień oddziaływań dynamicznych.



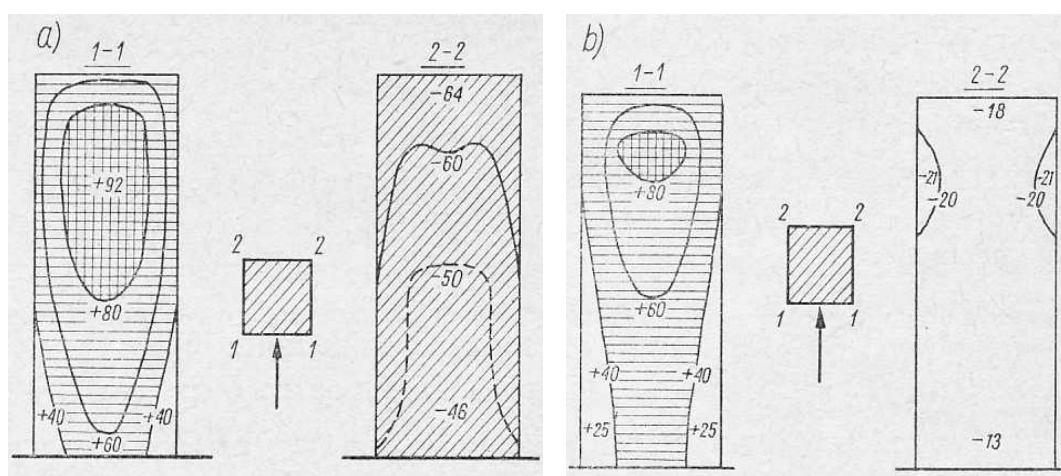
Rys. 3.7.1 Wykres zależności wysokości budynku do wielkości obciążeń wiatrem  
Źródło: [29,50]

Kluczową decyzją projektową wynikającą z wielkości obciążeń zewnętrznych oddziałujących na obiekt jest odpowiedni dobór systemu konstrukcyjnego przy jednoczesnym zapewnieniu realizacji nawet najbardziej



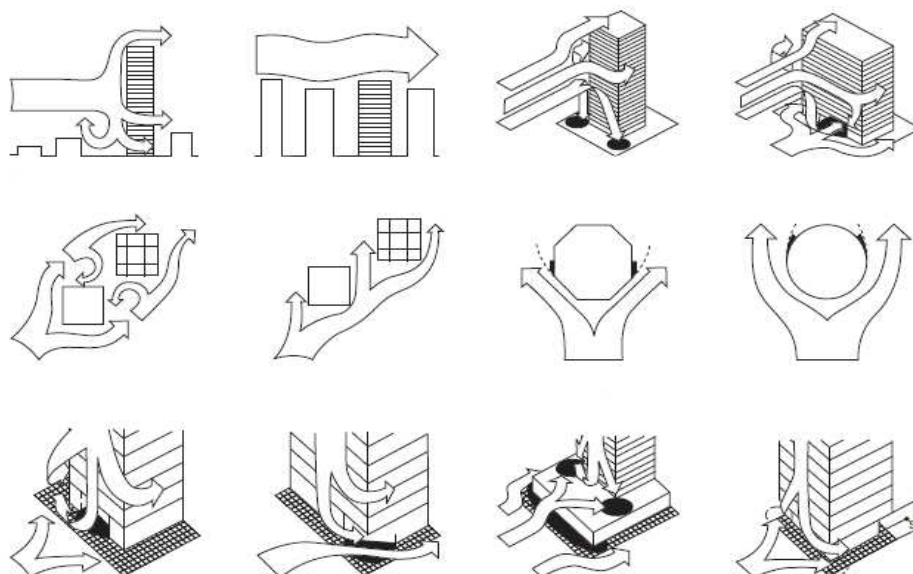
futurystycznej formy architektonicznej. Przeprowadzone badania i analizy zagadnień aerodynamicznych zaprezentowano szerzej w pracach [42,73,74], w których opisano korzyści wynikające ze zmiany geometrii przestrzennej bryły budynku oraz rzutu poziomego [41], co pozwoliło uzyskać istotne informacje praktyczne związane z kształtowaniem właściwej formy architektonicznej i jej strukturalnych determinant.

Wysokość budynku stanowi istotny czynnik przy wyznaczaniu wartości sił parcia lub ssania wiatru oddziałujących na obiekt wysokościowy. Schemat rozkładu wielkości obciążeń działających na płaską powierzchnię fasady budynku w dwóch wariantach zagospodarowania otoczenia wieżowca obrazują diagramy pokazane na Rys. 3.7.2 [79]. Przedstawione wartości na wskazanych schematach rysunkowych zostały wyrażone w procentach. Zagadnienia aerodynamiczne związane z ogólnie zdefiniowaną formą opływu strumienia wiatru wokół budynku zostały przedstawione dodatkowo na schematach rysunkowych (Rys. 3.7.3) opracowanych na podstawie badań i analiz aerodynamicznych [28,29,86].



Rys. 3.7.2 Wielkości ciśnień (oddziaływań) na ściany budynku wysokiego a) otwarte otoczenie budynku b) teren zabudowany wokół wieżowca

Źródło: [79]



Rys. 3.7.3 Schematy opisujące poglądowo formę opływu strumieni wiatru wokół budynków  
Źródło: [86]

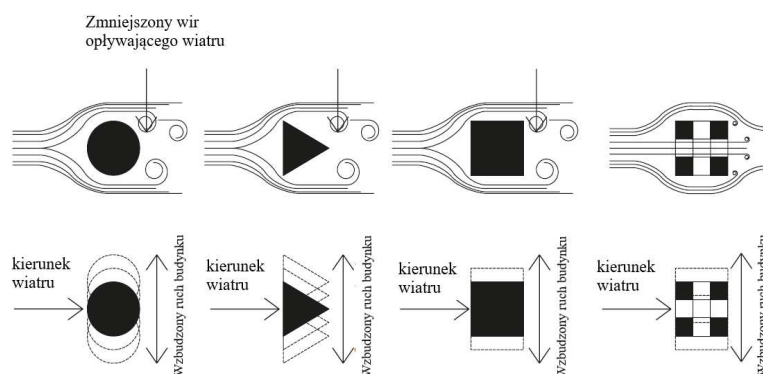
Wyniki z prowadzonych badań współczesnych budynków wysokich w tunelach aerodynamicznych wskazały najistotniejsze uwarunkowania projektowe dotyczące pożądaných form geometrycznych. Można do nich zaliczyć kształt bryły budynku i jego nieregularne formy architektoniczne. Klasyczne formy budynków wysokich zbliżone do naturalnych sylwetek przypominających pnie drzew oraz układy piramidalne o szerokiej podstawie i zmniejszającym się przekroju rzutu poziomego na szczycie obiektu są najbezpieczniejsze. Dowodem na słuszność przedstawionego wywodu jest stosowanie form geometrycznych uważanych za tradycyjne w budynkach najwyższych.

W ostatnich dwóch dekadach można zaobserwować zachodzące zmiany związane z odejściem od form klasycznych budynków wysokich, których obecne kształty geometryczne przyjmują postacie owalne, skręcone względem własnej osi lub przypominające kształt ogórka, klepsydry i odwróconej piramidy. Dynamiczny rozwój budownictwa wysokiego obserwowany na całym świecie pozwolił na poszukiwanie nowatorskich kształtów, które będą wzbudzać zainteresowanie odbiorcy oraz spełniać surowe wymogi teorii konstrukcji oraz zagadnień aerodynamicznych.

Dobór odpowiedniego systemu konstrukcyjnego wraz z pożądaną formą architektoniczną budynku wysokiego będzie miał kluczowe znaczenie przy formułowaniu decyzji projektowych.

Ciekawą aplikacją formy geometrycznej budynku w postaci „ogórka” jest wieżowiec autorstwa Normana Foster’a w Londynie o nazwie Swiss Re. Opływowa geometria przestrzenna budynku o wysokości 180 metrów jest najszersza w połowie wysokości i uzyskuje poprzez to spełnienie wymagań aerodynamicznych związanych z stałym współczynnikiem opływu wiatru warstwy przyściennej, utrzymując jednocześnie intrygującą formę spełniającą wymogi stawiane współczesnym obiektom wysokim.

Spełnienie warunków bezpieczeństwa budynku w odniesieniu do dominującego obciążenia poziomego wynikającego z oddziaływań wiatru, które zwiększa się wraz ze wzrostem wysokości w sposób logarytmiczny, jest kluczowe przy określeniu wymogów projektowych. Wpływ wiatru powoduje nie tylko wychylenia wierzchołka budynku, ale również sprawia, iż struktura nośna może doznać niebezpiecznych drgań prostopadłych do kierunku oddziaływań poziomych (Rys. 3.7.4). Powstałe drgania mogą być niebezpieczne dla użytkowników oraz ustroju nośnego [76, 84]. Częstotliwość wzbudzenia konstrukcji w przedziale od 0,3 Hz do 10 Hz jest najbardziej niekorzystna dla człowieka, gdyż w tym zakresie znajdują się podstawowe częstotliwości rezonansowe ważnych organów ciała ludzkiego [15]. Dobrą miarą „jakości” systemu konstrukcyjnego [73,74] będzie jego odporność na oscylacyjne przemieszczenia szczytu oraz zjawiska rezonansu w określonych przedziałach występowania. Budynek o większej sztywności odpowiada na wyższe wartości obciążeń wiatrem i drga szybciej, a wprowadzenie jego systemu konstrukcyjnego w niebezpieczne drgania rezonansowe jest trudniejsze.



Rys. 3.7.4 Opływ wiatru wokół różnych kształtów budynków wysokich oraz odpowiadająca im forma drgań ustroju nośnego  
 Źródło: [76, 84]

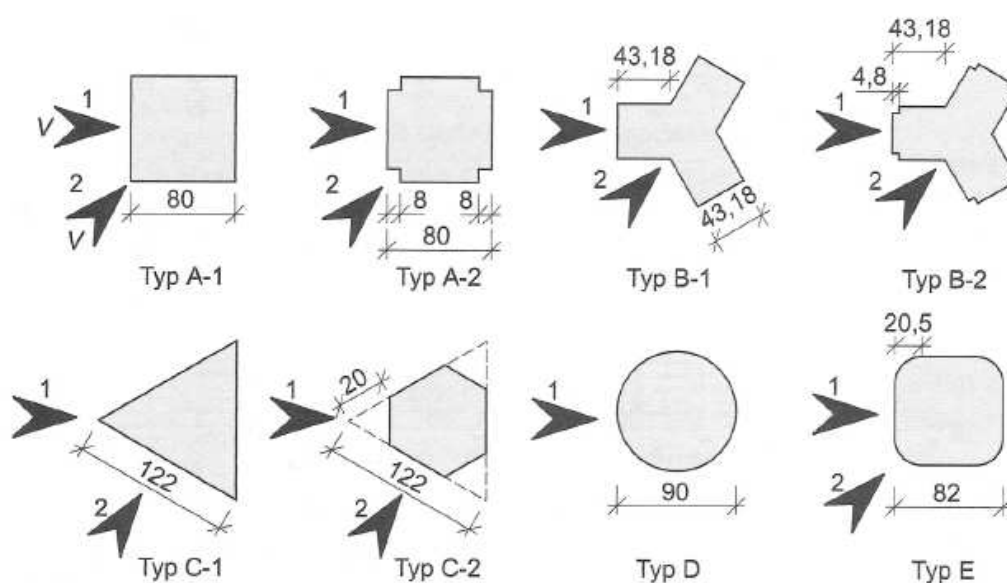
Kształty aerodynamiczne form budynków wysokich umożliwiają niezaburzone przemieszczanie się strumieni powietrza wzdłuż ścian obiektu. W celu zdefiniowania uwarunkowań korzystnego kształtowania struktur przestrzennych współczesnych budynków wysokich związanych z zagadnieniami aerodynamicznymi można posłużyć się wynikami badań zawartych w pracach [18,19], w postaci wielkości współczynnika oporu aerodynamicznego  $C_x$ . Przeprowadzone badania i analizy w tunelach aerodynamicznych wykazały, iż przeprojektowanie ostrych krawędzi form budynków wysokich na kształty bardziej zaokrąglone pozwala uzyskać niższy współczynnik oporu aerodynamicznego  $C_x$ , a w konsekwencji niższe wartości naprężeń w elementach konstrukcyjnych (Tabela 2).

Tabela 2 Zestawienie tabelaryczne współczynnika aerodynamicznego  $C_x$  dla rzutu poziomego budynków wysokich przy wariacie ostrych krawędzi oraz zaokrąglonych  
 Źródło: [18,19]

Kształt przekroju	Ostre krawędzie	Zaokrąglone krawędzie
	$r/D = 0$	$r/D = 0,25$
□	2,0	1,2
◇	1,55	1,5
▭	1,5	0,6
▭	2,0	1,6
◁	1,2	1,1
◁	1,55	
▷	2,0	1,3
∩	2,3	
∪	1,2	

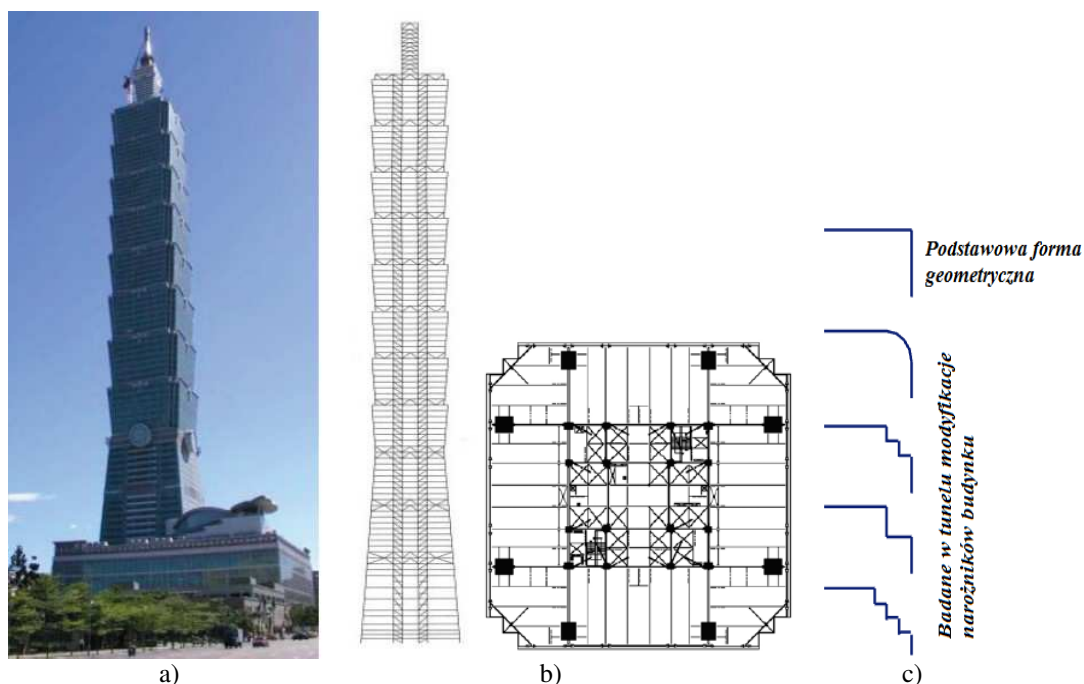
$r$  – promień zaokrąglenia krawędzi;  $D$  – szerokość poprzeczna przekroju

Rozwinięciem przedstawionych powyżej zależności dotyczących współczynnika  $C_x$ , były badania zaprezentowane w pracach [28,29] dotyczące redukcji niekorzystnych wpływów aerodynamicznych na obiekty wysokościowe. Przeprowadzone badania czterech form wieżowca (Rys. 3.7.5) w tunelach aerodynamicznych wykazały słuszność założeń projektowych związanych z odpowiednią modyfikacją rzutu poziomego budynku. Efektem wykonanych modyfikacji może być zmniejszenie dla określonych kształtów współczynnika oporu aerodynamicznego  $C_x$  nawet o 40%.



Rys. 3.7.5 Kształty badanych wieżowców  
Źródło: [18]

Reprezentatywnym przykładem wykorzystania badań opływu wiatru wokół budynku jest wieżowiec Taipei 101 na Tajwanie o wysokości 508 metrów. Projektanci obiektu chcąc zoptymalizować wymiary geometryczne elementów nośnych zmodyfikowali podstawowy kształt geometryczny narożników uzyskując zmniejszenie obciążeń wiatru na krawędziach o około 30% [52]. Rodzaj modyfikacji geometrycznej przedstawia rysunek Rys. 3.7.6 a, b, c.



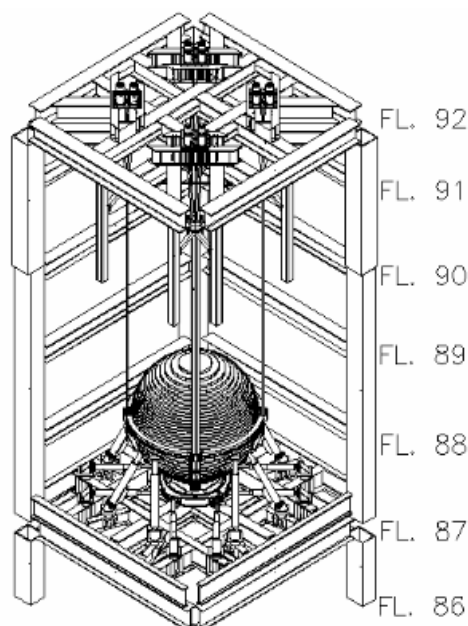
Rys. 3.7.6 a, b, c (a) Budynek Taipei 101 wraz z schematem ukształtowania formy geometrycznej (b) rzut typowej kondygnacji budynku Taipei 101 (c) modyfikacje narożników budynku badane w tunelu aerodynamicznym

Źródło: [29]

W ramach oddziaływań siły zewnętrznych na budynek ekstremalny, oprócz obciążeń klimatycznych związanych w szczególności z działaniem siły wiatru w postaci parcia i ssania oraz zachodzących zjawisk w najbliższym otoczeniu analizowanej budowli, można ponadto wyodrębnić oddziaływania sejsmiczne.

Przemieszczenie gruntu spowodowane trzęsieniem ziemi przyczynia się do powstania przemieszczeń budynku i wywołuje siły masowe rozmieszczone na całej wysokości obiektu [32]. Charakterystykę oddziaływań sejsmicznych na budynek można przyrównać poprzez analizę punktów masowych do obciążeń poziomych zaczepionych na różnej wysokości obiektu. Różna postać podatności ustrojów nośnych będzie przyczyniać się do powstania innej wielkości deformacji przestrzennej bryły budynku. Konstrukcje sztywne, takie jak żelbetowe lub kompozytowe, absorbują część energii wywołanej przemieszczeniem gruntu wynikającym z trzęsienia ziemi [32]. Jedną z form redukcji nadmiernych wychyleń związanych z wpływem sił sejsmicznych na budynek, jest stosowanie specjalnych mechanizmów stabilizujących [52]. Reprezentatywnym przykładem jest tłumik drgań harmonicznego systemu TMD zastosowany w budynku Taipei 101 zaprojektowany przez biuro Thornton Tomasetti Engineers.

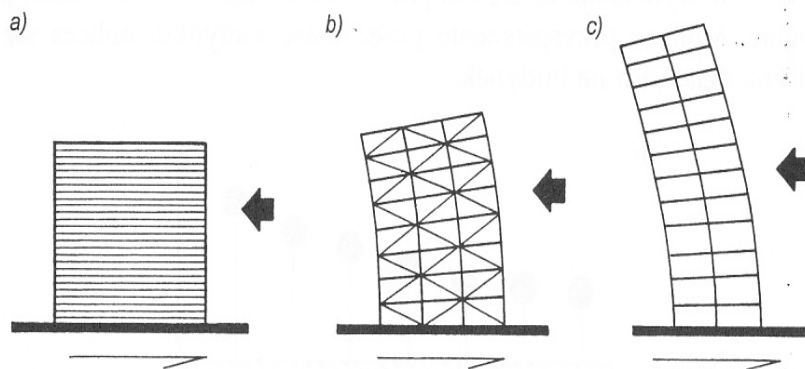
Absorbent (Rys. 3.7.7) o wadze 650 ton, którego masa stanowi zaledwie 0,1% całkowitej masy budynku, zawieszono na 92 kondygnacji budynku na szesnastu stalowych linach, z których każda miała średnicę przekroju poprzecznego równą 10 centymetrów. Ich układ zamodelowano tak, aby w trakcie przechylenia obiektu odchyłał się w przeciwną stronę niwelując niekorzystne zjawisko geometrycznej zmiany położenia o 45%.



Rys. 3.7.7 Schemat rysunkowy mechanizmu stabilizującego w budynku Taipei 101  
Źródło: [i10]

Ustroje nośne budynków wysokich, które wykazują się większą podatnością na działanie sił poziomych, będą mieć drgania własne zbliżone do okresom drgań gruntu [32]. Zależność wpływu sił bezwładności względem budynków o odmiennych wartościach podatności konstrukcji na działanie sił dynamicznych przedstawia schemat (Rys. 3.7.8). W ostatnich dwóch dekadach udało się pozyskać wiele praktycznych informacji dotyczących rzeczywistej odpowiedzi budynku na działanie sił sejsmicznych. W początkowym okresie projektowania budynków wysokich lokowanych w strefach występowania zjawisk sejsmicznych uważano, iż konstrukcje ramowe są odporniejsze na wpływy sejsmiczne niż inne systemy konstrukcyjne. Uznawano, iż podatność układu ramowego charakteryzuje się dłuższym okresem drgań własnych, co jest przyczyną powstawania niższych przyspieszeń konstrukcji i tym samym mniejszych sił wewnętrznych. Wyniki badań

przeprowadzonych wspólnie wykazały, iż sztywne budynki z właściwie zaprojektowanymi ścianami usztywniającymi wewnętrznymi spełniają najlepiej swoją funkcję [91]. Zmiana podejścia projektowego widoczna jest w obecnych realizacjach obiektów najwyższych, gdzie wpływ sił sejsmicznych na budynek może być bardzo duży.



Rys. 3.7.8 Zależność wpływu sił bezwładności na zachowanie ustroju nośnego budynków  
 (a) budynek i fundament są sztywne (b) niższe konstrukcje, które częściowo absorbują energię  
 (c) budynki wysokie o podatnej konstrukcji na oddziaływania poziome

Źródło: [32]

### Krótkie podsumowanie:

Współczesne budynki wysokie cechuje indywidualizm form architektonicznych, których unikatowość ma na celu utrwalenie wizerunku wieżowca w świadomości możliwie jak najszerszego kręgu odbiorców architektury. Przedstawione w niniejszym podrozdziale uwarunkowania kształtowania formy architektonicznej i jej strukturalnych determinant w odniesieniu do działających obciążeń zewnętrznych potwierdziło silną korelację pomiędzy nimi. Wyodrębniona w niniejszej analizie zależność  $f/H$  jest prostym oraz wygodnym wskaźnikiem opisującym sztywność przestrzenną budynku wysokościowego [15]. Obecne tendencje w projektowaniu wieżowców uwzględniają zasady aerodynamiki związane z oddziaływaniem wiatru oraz wpływem sił sejsmicznych. Zrealizowane obiekty najwyższe potwierdzają prawidłową i logiczną zależność formy architektonicznej, systemu konstrukcyjnego oraz wpływu oddziaływań zewnętrznych.



### 3.8. Uwarunkowania wynikające z zasad ekologii i najnowszych technologii

We współczesnym świecie dla zapewnienia rozwoju społeczno-gospodarczego konieczne jest wdrożenie zasad rozwoju zrównoważonego [37, 94], których realizacja umożliwi zwiększenie zakresu ochrony naturalnego środowiska człowieka [94]. W latach 70 XX wieku, kiedy to nastąpił znaczący rozwój technologii i technik budownictwa, w którym również miało swój udział budownictwo wysokie na świecie powstaje przełomowy dokument dotyczący ochrony dóbr przyrodniczych. Sekretarz generalny ONZ U Thant ogłasza na forum światowym swój raport pt. „Człowiek i jego środowisko”. We wspomnianym dokumencie zaprezentowano szczegółowe dane dotyczące skali zniszczenia środowiska naturalnego wraz z prognozami zagrożeń na życie ludzkie. Dokument, który nazywany jest potocznie „Raportem U Thanta” pokazał katastrofalny wpływ działalności człowieka na środowisko naturalne oraz konflikt pomiędzy przyrodą, a gospodarczą aktywnością człowieka. Przez kolejne lata społeczność międzynarodowa, a wśród niej również projektanci budynków wysokich, aktywnie próbują zmniejszyć negatywny wpływ człowieka na środowisko i przybliżyć naturę człowiekowi w wielu dziedzinach życia.

Jednym z nich są współczesne tendencje projektowe budynków wysokich, które w sposób znaczący związane są z rozwiązaniami proekologicznymi [9,52,88]. Aplikacja rozwiązań technicznych pozwalająca na stworzenie budynku niekoniecznie wysokiego, ale o niskim zapotrzebowaniu na energię, staje się wiodącym priorytetem. Idea i zasady rozwoju zrównoważonego [37,75, 94] mają istotny wpływ na procesy projektowe budynków wysokich. Architekci i konstruktorzy będący autorami obiektów wysokościowych mają świadomość, iż wznoszenie wieżowców, związane z postępowaniem cywilizacyjnym, powinno odbywać się w zgodzie z zasadami ekologii. Wzniesienie nowej zabudowy budynków wysokich, określanej drugim poziomem życia miejskiego, jest zjawiskiem logicznym i naturalnym, gdyż pozwala uzyskać dużą intensywność zabudowy przy stosunkowo niewielkiej powierzchni działki na której znajduje się wieżowiec. Przykłady przytoczone w niniejszej analizie wskazują, iż wykorzystanie zieleni w budynku wysokim lub stworzenie "podniebnych tarasów", które przybliżą ich

użytkownikom naturę, nie są formą symboliczną [88], lecz rzeczywiście zrealizowanym postulatem społecznym.

W projektowaniu energooszczędnym budynku szczególnie istotne znaczenie mają przegrody zewnętrzne w postaci fasad szklanych [13,53,56] tworzących współczesną formę i bryłę architektoniczną wieżowca. Przyjmuje się, że aplikacja rozwiązań pro-ekologicznych w budynkach wysokich symbolicznie rozpoczyna się od momentu wybudowania Commerzbank Tower we Frankfurcie nad Menem autorstwa architekta Normana Foster'a w 1997 roku. Wdrożenie szeregu rozwiązań związanych ze zmniejszeniem zapotrzebowania energii pozyskiwanej ze źródeł kopalnianych na rzecz odnawialnych, staje się wzorem realizacji późniejszych eko-wieżowców.

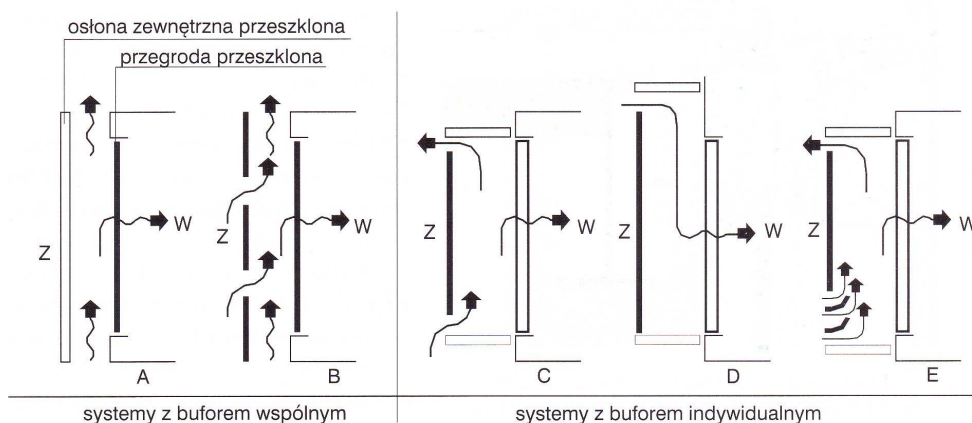
Światowy komitet CTBUH zajmujący się budownictwem wysokim, chcąc zachęcić projektantów do stosowania rozwiązań pro-ekologicznych, wprowadził dodatkową certyfikację wieżowców o oznaczeniu LEED. Stosowanie rozwiązań „*eco-tech*” jest oczywistą konsekwencją postępu technologicznego „*high-tech*” [9, 52]. Idea budowy budynku inteligentnego oraz ekologicznego należy do podstawowych dążeń współczesnych projektantów. Wieżowiec będzie można określić jako wysoko zaawansowany nie tylko ze względu na samo stosowanie rozwiązań nowoczesnych systemów technicznych, lecz także dzięki zastosowaniu zespołu ich działań związanych z zagadnieniami pro-ekologicznymi [53]. We współczesnych budynkach wysokich projektanci sięgają po rozwiązania techniczne, które w sposób znaczący umożliwiają ograniczenie ilości zużywanej energii oraz pozwalają na produkcję energii na potrzeby własne wieżowca. Do podstawowych można zaliczyć rozwiązania projektowe związane z zastosowanymi systemami konstrukcyjnymi, pozwalającymi na maksymalne doświetlenie powierzchni wewnętrznych, a ponadto stosowanie mieszanych systemów chłodzenia i ogrzewania, klimatyzacji i wentylacji naturalnej oraz odzysku ciepła. Mimo małej obecnie skuteczności i wydajności technicznej coraz częściej stosowane są kolektory słoneczne oraz ogniwa fotowoltaiczne. Trwają intensywne prace nad rozwojem tych systemów w celu zwiększenia ich wydajność. Do ogrzewania obiektów stosuje się również źródła geotermalne poprzez wykorzystanie

fundamentów palowych, które omówiono w podrozdziale dotyczącym uwarunkowań geologicznych.

Kolejnym reprezentatywnym rozwiązaniem „eco-tech” jest zbieranie wody deszczowej za pomocą kolektorów zbiorczych i wykorzystywanie jej do potrzeb sanitarnych oraz nawadniania zaprojektowanych ogrodów zielonych znajdujących się wewnątrz budynku, na jego dachu oraz wokół niego.

„Podniebne ogrody”, które zgodnie z tezą znanego architekta Kennetha Yeanga, aby „*Żyć i pracować w centrum*” mają przybliżyć naturę człowiekowi.

Z analiz ekonomicznych wynika, że zasadniczy wpływ na ogólny bilans energetyczny wieżowca ma jego ściana osłonowa. Budynki wysokie zachwycają często swoją architekturą dzięki zastosowaniu unikatowych, przykuwających uwagę form przestrzennych elewacji szklanych lub rozwiązań mieszanych z innymi materiałami budowlanymi. Częstość rozwiązaniem, który w znaczący sposób wspomaga wentylację i klimatyzację budynku oraz zwiększa komfort użytkownika obiektu, są systemy podwójnych fasad (Rys. 3.8.1), z automatyką opartą na analizie warunków środowiskowych [40]. Poprawiają one warunki cieplne wewnątrz obiektu oraz izolacyjność akustyczną przegród pionowych.

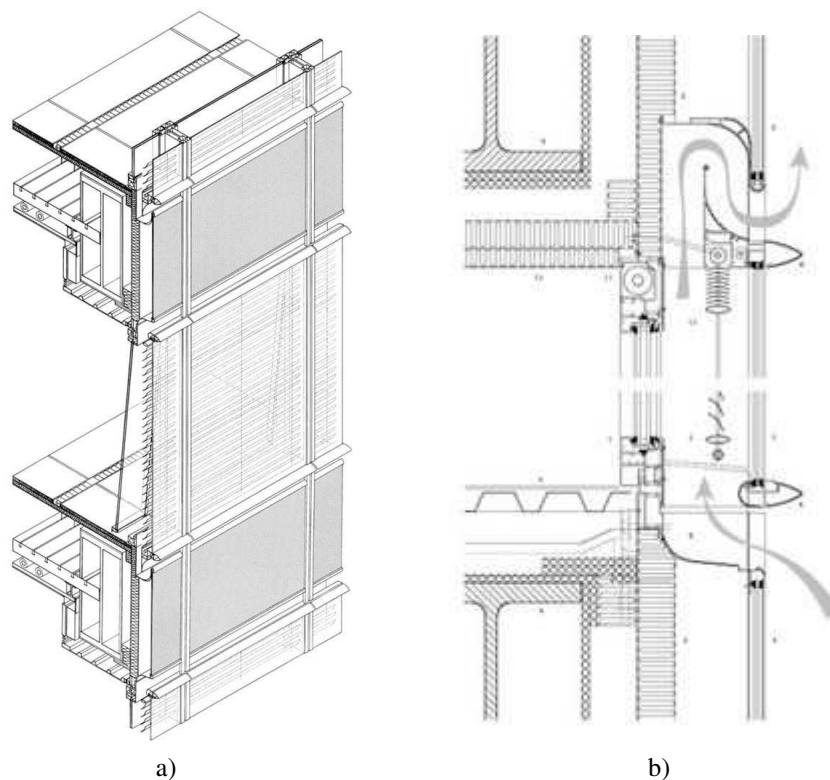


Rys. 3.8.1 Schematy podwójnych fasad wraz z systemem wentylacji

Źródło: [13]

Ciekawym przykładem zastosowania podwójnej fasady w budynku wysokim, który zarazem jest prekursorem wieżowców pro-ekologicznych, jest Commerzbank we Frankfurcie nad Menem. Zastosowane rozwiązanie zakłada, iż pomiędzy wewnętrzną i zewnętrzną przegrodą szklaną jest korytarz powietrzny o głębokości traktu około 50-80 centymetrów (Rys. 3.8.2 a i b). Dodatkową zaletą

tego rozwiązania jest możliwość otwierania okien w przegrodzie wewnętrznej i uzyskanie kontaktu z napływającym powietrzem ze strony zewnętrznej. W wewnętrznym korytarzu zamontowano dodatkowo szereg mechanizmów przysłania w postaci paneli, które regulują ilość przenikającego światła do wnętrza obiektu.



Rys. 3.8.2 a i b Detale podwójnych ścian fasadowych budynku Commerzbank we Frankfurcie nad Menem

Źródło: [i2]

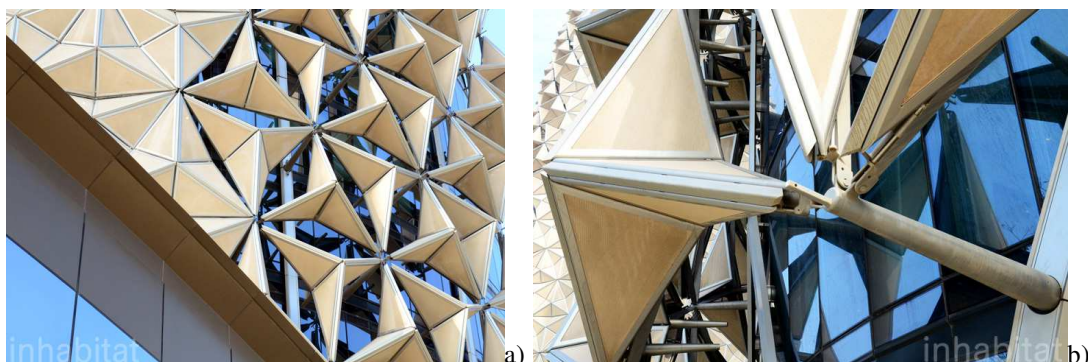
„Przegrody zewnętrzne budynku w ramach przenikalności dla światła, ciepła, powietrza, a także widoczności muszą być podatne na zmiany i docelowo być sterowalne, aby móc reagować na zmieniające się warunki klimatu lokalnego np. osłony słoneczne przeciw olśnieniowe, kierowanie światłem, zacienianie, okresowa ochrona cieplna, zmienna wentylacja”<sup>13</sup>. W myśl tej zasady wysiłki projektantów podążają w kierunku stosowania nowatorskich rozwiązań we współczesnych realizacjach budynków wysokich. W zależności od przyjętej koncepcji formy architektonicznej obiektu i zastosowanego systemu konstrukcyjnego, poszczególne przegrody fasad wieżowców mogą mieć odmienną budowę i występować we wzajemnie zróżnicowanej konfiguracji.

<sup>13</sup> Cytat z *Europejskiej Karty Energii Słonecznej*, w odniesieniu do planowania, budowania i użytkowania budynków. „Glass” nr 3/1997r. Str. 56

Jednym z reprezentatywnych rozwiązań jest innowacyjna fasada bliźniaczych wież Al Bahr Towers w Abu Dhabi, każda z tych wież ma wysokość 145 metrów. Zewnętrzna ściana osłonowa jest strukturą samonośną, która otwiera się i zamyka w odpowiedzi na trajektorię przesuwania się słońca [30]. Dwuwarstwowa ściana obiektu została tak zaprojektowana, aby membrana ETFE rozpięta na ruchomym stelażu (Rys. 3.8.3 a, b, Rys. 3.8.4 a, b), była odpowiednio ustawiona względem kierunku padania słońca. Dotąd niespotykane rozwiązanie dla wieżowców zostało zaprojektowane przez zespół inżynierów z biur Aedas oraz Arup. Pozwoliło to, na uzyskanie komfortowego mikroklimatu wnętrza oraz zmniejszenia zapotrzebowania na energię zużywaną w systemach klimatyzacji i wentylacji. Zastosowanie paneli fotowoltaicznych oraz szeregu rozwiązań proekologicznych, które ograniczyło emisję CO<sub>2</sub> o 1750 ton rocznie [30], pozwoliło uzyskać budynkom tytuł LEED Silver. Innowacyjna przysłona składająca się z ponad 1000 modułów o wymiarach 4 metry x 6 metrów dla każdej z wież Al Bahr, pokrywa 75% powierzchni elewacji obiektów, co umożliwiło redukcję zapotrzebowania na energię dla urządzeń klimatyzacyjnych o 20% [30]. Jedynie od strony północnej obiekty nie posiadają wspomnianego rozwiązania.



a) b)  
Rys. 3.8.3 a i b Bliźniacze wieże Al Bahr wraz z współczesną „mashrabiya”  
Źródło: [i1]



Rys. 3.8.4 a i b Bliźniacze wieże Al Bahr wraz z współczesną „mashrabiya”

Źródło: [i1]

Wykorzystanie uwarunkowań aerodynamicznych związanych z nadaniem opływowych i zaokrąglonych kształtów fasad szklanych [13,52] jest korzystne ze względu na dążenia do obniżenia wartości obciążeń działających na pionowe przegrody zewnętrzne oraz główny system konstrukcyjny wieżowca.

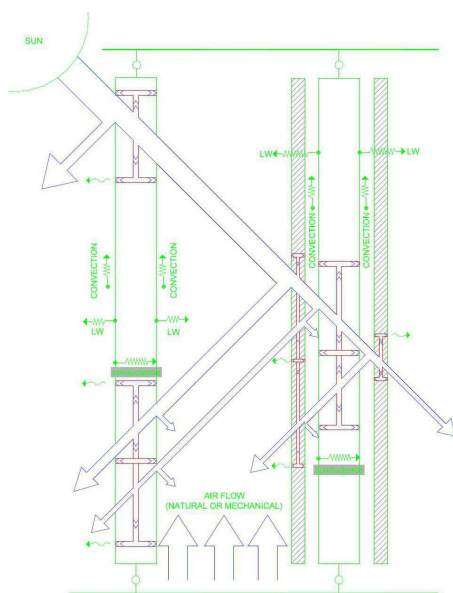
Współczesnym przykładem aplikacji zagadnień proekologicznych wykorzystujących energię pozyskaną z działania wiatru przy założeniach aerodynamicznych w budynku wysokim jest Pearl River Tower (Rys. 3.8.5 a i b), którego budowę ukończono w 2011r w Chinach. Obiekt o wysokości 309 metrów był zaprojektowany przez biuro SOM i Guangzhou Design Institute z myślą, aby osiągnąć status tzw. zero energetycznego budynku wysokiego [9].



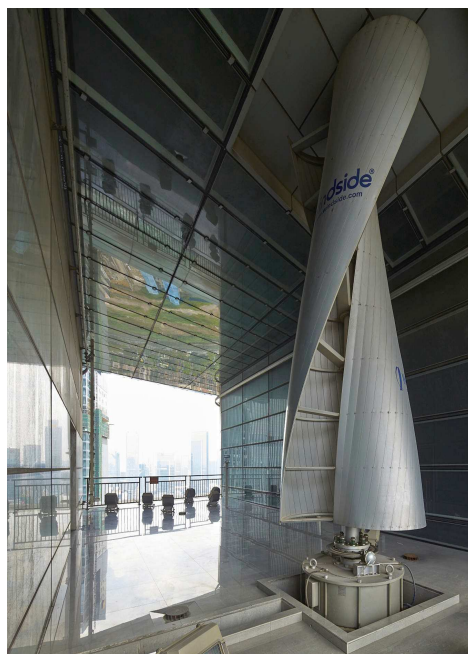
Rys. 3.8.5 a i b Budynek Pearl River w Guangzhou w Chinach widok elewacji

Źródło: [i1]

W zamierzeniu autorów było zaprojektowanie największej ilości rozwiązań „*high-tech*” związanych ze wspomaganiami zagadnień ekologicznych, aby uzyskać status LEED Platinum. Do grona zastosowanych rozwiązań innowacyjnych można zaliczyć: wentylowany system podwójnych fasad z automatycznie regulowanymi przesłonami (Rys. 3.8.6), połączenie systemów klimatyzacji i wentylacji naturalnej, niskoenergetyczny system oświetlenia, rozbudowany system fotowoltaiczny wykorzystujący geometrycznie ukształtowanie elewacji, stworzenie strategii odzysku energii wprowadzonej do obiektu oraz zastosowanie wysoko wydajnych pionowych turbin wiatrowych zintegrowanych z budynkiem (Rys. 3.8.7).



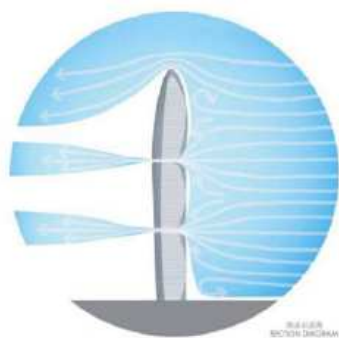
Rys. 3.8.6 System podwójnych fasad  
Źródło: [i4]



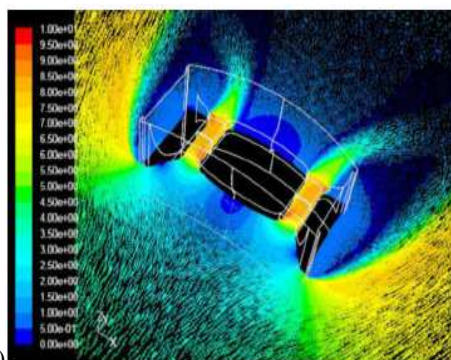
Rys. 3.8.7 System pionowych turbin zintegrowanych z budynkiem  
Źródło: [i4]

Przyjęta forma architektoniczna bryły budynku pozwala na efektywne pozyskanie energii z ogniw fotowoltaicznych oraz oddziaływań wiatru. Krzywizna elewacji została zaprojektowana według zasad aerodynamicznych w celu zmniejszenia obciążeń działających na ustrój nośny budynku (Rys. 3.8.8 a i b) [9,50]. Pozytywnym skutkiem zastosowania rozwiązań pro-ekologicznych oraz zaawansowanych systemów zarządzania budynkiem typu "*high-tech*" (ang: BMS) była redukcja konsumpcji energii o około 60% [9]. Zaprezentowany przykład

wieżowca, jakim jest Pear River Tower, który stał się krokiem milowym w stworzeniu samowystarczalnego budynku wysokiego, jest ważnym elementem w zrozumieniu współczesnych trendów projektowych budynków wysokich.



*Badanie  
przeważających  
kierunków  
wiatru*



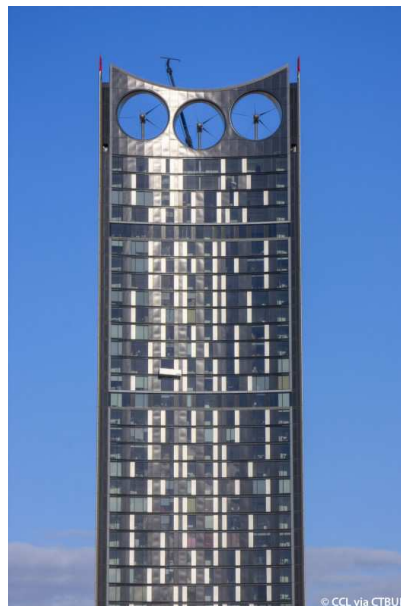
a) b)

Rys. 3.8.8 a i b Zjawiska aerodynamiczne związane z oddziaływaniem wiatru na budynek Pear River  
Źródło: [i4]

Innowacyjne rozwiązania inżynierii wiatrowej z powodzeniem zastosowano w wielu innych obiektach wysokościowych. Wśród reprezentatywnych przykładów można wymienić 240 metrowe dwie wieże Bahrain World Trade Center 1 i 2 w Manamie (Rys. 3.8.9) oraz wieżowiec Strata SE1<sup>14</sup> w Londynie o wysokości 148 metrów (Rys. 3.8.10). Zastosowane turbiny wiatrowe w obu obiektach pozwalają uzyskać około 15% całkowitego zapotrzebowania budynku na energię [9].



Rys. 3.8.9 Turbiny wiatrowe w budynku Bahrain World Trade Center  
Źródło: [i1]



Rys. 3.8.10 Turbiny w budynku Strata SE1  
Źródło: [i1]

<sup>14</sup> Inna nazwa budynku to: The Razor



Idea budownictwa zrównoważonego, związana w budynkach wysokich z rozwiązaniami pro-ekologicznymi, wzmacniana jest poprzez zbliżenie budynku oraz jego użytkownika do wskazanych warunków środowiska naturalnego [37,52]. Bogata infrastruktura bioklimatyczna w budynkach wysokich jest cennym rozwiązaniem w dyskusji z przeciwnikami zabudowy wysokiej. Współczesnym reprezentatywnym przykładem zastosowania zielonych ogrodów wewnątrz budynku, które zajmują około 33% powierzchni, jest 632 metrowy budynek Shanghai Tower w Shanghaju.

### **Krótkie podsumowanie:**

Ściany osłonowe oprócz pełnienia zadań dotyczących bilansu cieplnego spełniają również w niektórych systemach konstrukcyjnych formę nośną. Formy architektoniczne współczesnych budynków coraz częściej wykorzystują współzależność kształtu elewacji związanej bezpośrednio z formą architektoniczną i pośrednio z rodzajem konstrukcji. Wyniki badań i analiz technicznych potwierdziły, iż zastosowanie podwójnych fasad pozwala na uzyskanie oszczędności na kosztach związanych z ogrzewaniem rzędu około 30% i średnio 70% kosztów na klimatyzacji [53]. Dążenie do redukcji zużycia energii przez wieżowce jest nie tylko chwilowym trendem projektowym, lecz wręcz koniecznością w spełnianiu zasad zrównoważonego rozwoju. Zastosowanie rozwiązań „eco-tech” sterowanych przez systemy „high-tech” w obiektach wysokościowych będzie miało prawdopodobnie swój skutek także w późniejszych realizacjach budynków niskich. Zagadnienia związane z „inteligentnym budynkiem” i „eco-tech” oraz nowatorskimi formami architektonicznymi są ważnymi nurtami w dominującej obecnie tendencji projektowej obserwowanej we współczesnych realizacjach wieżowców na całym świecie.

## **4. Analiza nowoczesnych rodzajów struktur nośnych budynków wysokich**

### **4.1. Zdefiniowanie narzędzi badawczych przyjętych w celu przeprowadzenia analizy**

Wraz ze wzrostem wysokości budynku oraz powstaniem skomplikowanych form architektonicznych dobór systemów konstrukcyjnych nie zależy w swoim podstawowym znaczeniu tylko od warunków nośności stropów między kondygnacyjnych czy kształtowania fundamentów, lecz w dużej mierze jest zależny od sztywności i stateczności przestrzennej całego obiektu. Projektowane budynków coraz wyższych wiąże się z zagadnieniem zwiększonego obciążenia poziomego, dominującego w całej rodzinie oddziaływań. Wartości sił wewnętrznych wynikających z oddziaływania wiatru zwiększają się liniowo wraz ze wzrostem wysokości budynku [50], momenty zginające w dolnej części budynku wysokiego zwiększają się proporcjonalnie do kwadratu jego wysokości, a wychylenia poziome – proporcjonalnie do potęgi czwartej [83].

Podstawowymi narzędziami dla przyjętej metody badawczej jest wyodrębnienie grupy obiektów wysokich o dominujących cechach charakteryzujących obiekty ponadczasowe, ponadregionalne oraz takie, które stały się ikonami form architektonicznych i są znane na całym świecie. Proces wyodrębnienia grupy budynków niezbędnych do przeprowadzenia badań nad relacją kształtowania form architektonicznych, a rozwojem systemów nośnych konstrukcyjnych, był oparty na przeprowadzeniu indywidualnego studium przypadków.

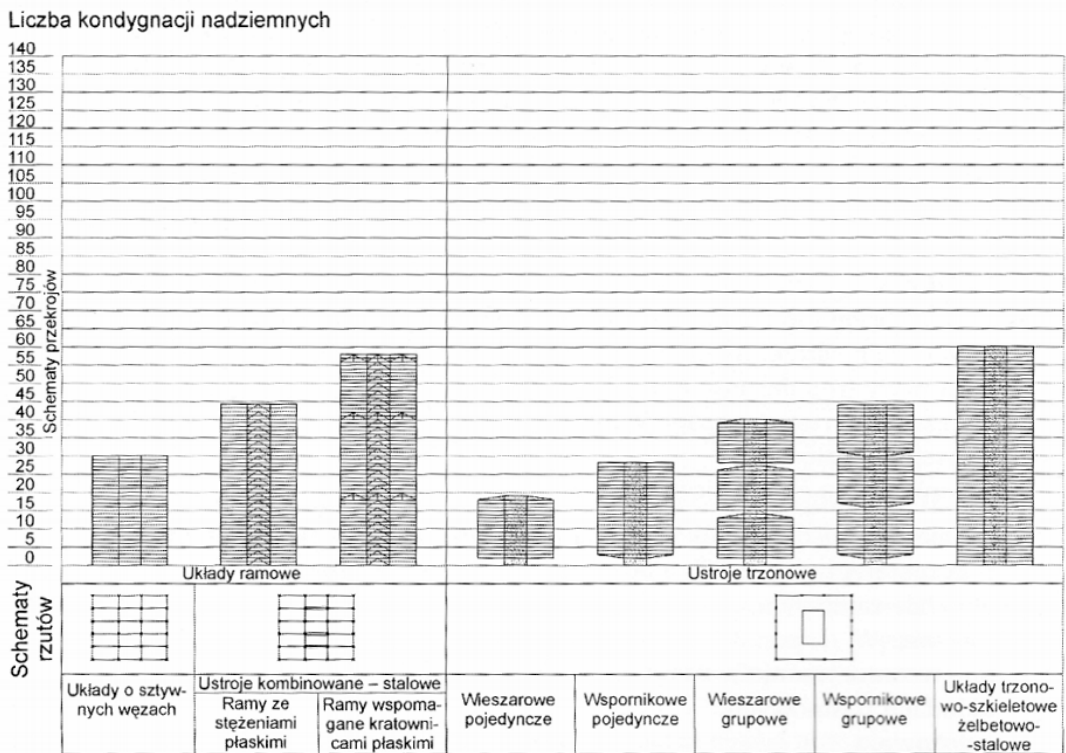
### **4.2. Określenie kryteriów doboru obiektów będących przedmiotem analizy**

Kryterium doboru obiektów wysokościowych ujętych w przedmiotowej pracy opiera się na analizie wielokryterialnej. Podstawowym założeniem jest przedstawienie takich warunków brzegowych, których czynniki opisujące dany proces projektowy, warunki techniczne i technologiczne realizacji budynków wysokich są dominujące. Dla przeprowadzenia analizy badawczej wyodrębniono następujące kryteria:

- a) wysokość budynku oraz liczba kondygnacji nadziemnych i podziemnych

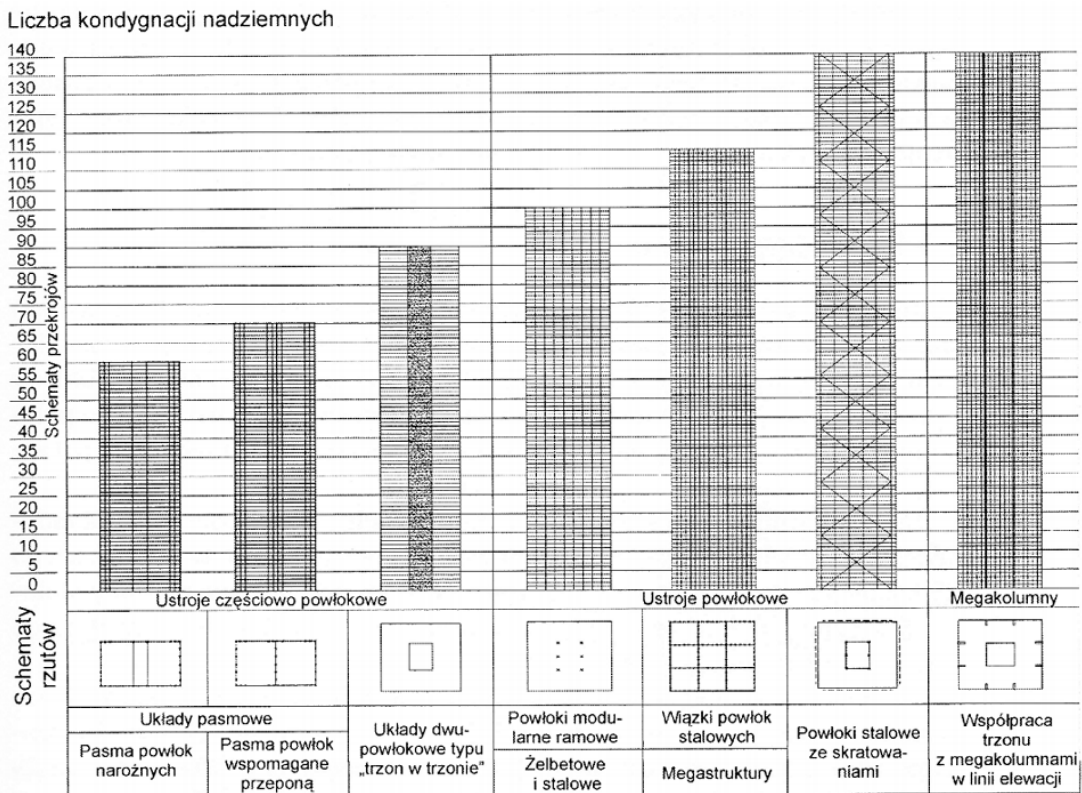
- b) stateczność przestrzenna budynku związana z przyjętym systemem konstrukcyjnym
- c) indywidualizm formy architektonicznej oraz strukturalna zdolność przyjętego systemu konstrukcyjnego do przenoszenia zwiększonych obciążeń poziomych
- d) rodzaj materiału użytego do realizacji elementów tworzących fasadę budynku wysokościowego oraz tworzących główne elementy nośne
- e) innowacyjność rozwiązań form architektonicznych oraz postaci nowoczesnych systemów konstrukcyjnych.

W dostępnej literaturze polskiej i angielskojęzycznej można odnaleźć wiele klasyfikacji systemów konstrukcyjnych budynków wysokich. Do najbardziej znanych i rozpowszechnionych w polskojęzycznych publikacjach naukowych można zaliczyć poniżej podane (Rys. 4.2.1, Rys. 4.2.2, Rys. 4.2.3, Rys. 4.2.4). Przedstawione na Rys. 4.2.5 oraz na Rys. 4.2.6 schematy klasyfikowania ustrojów nośnych budynków wysokich w publikacjach angielskojęzycznych są odzwierciedleniem tych rozpowszechnionych w Polsce. Ujęte klasyfikacje na schematach rysunkowych w niniejszej dysertacji są ze sobą spójne niezależnie od materiału źródłowego. Celem przybliżenia istniejącego stanu wiedzy na temat klasyfikacji systemów konstrukcyjnych budynków wysokich stosowanych w literaturze przedmiotu, w tej pracy przedstawiono te, które są zaakceptowane przez badaczy i projektantów obiektów wysokościowych na całym świecie. Analiza dostępnych materiałów wskazuje, iż przyjęta klasyfikacja jest ogólnie poprawna, jednakże wymaga aktualizacji ze względu na wysoką dynamikę zmian zachodzących w procesie projektowania oraz wznoszenia współczesnych wieżowców. Zaproponowane zmiany w niniejszej dysertacji, w porównaniu do klasyfikacji stosowanych do tej pory, pozwolą lepiej zrozumieć zalety i wady systemów konstrukcyjnych oraz ich wpływ na kształtowanie obecnie dominujących form architektonicznych budynków ekstremalnych. Właściwy dobór systemu konstrukcyjnego powinien być podyktowany wieloma czynnikami technicznymi. Jednym z podstawowych jest projektowana wysokość budynku oraz liczba kondygnacji nadziemnych (Tablica 3).



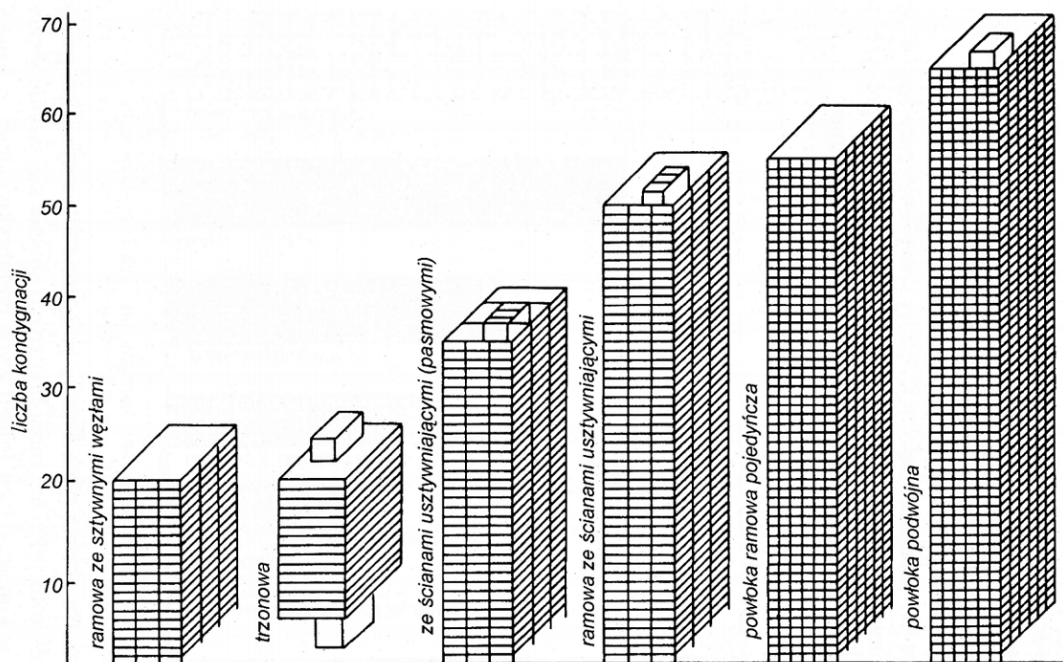
Rys. 4.2.1 Klasyfikacja budynków ze względu na przyjęty system konstrukcyjny oraz liczbę kondygnacji, budynki niższe

Źródło: [53]

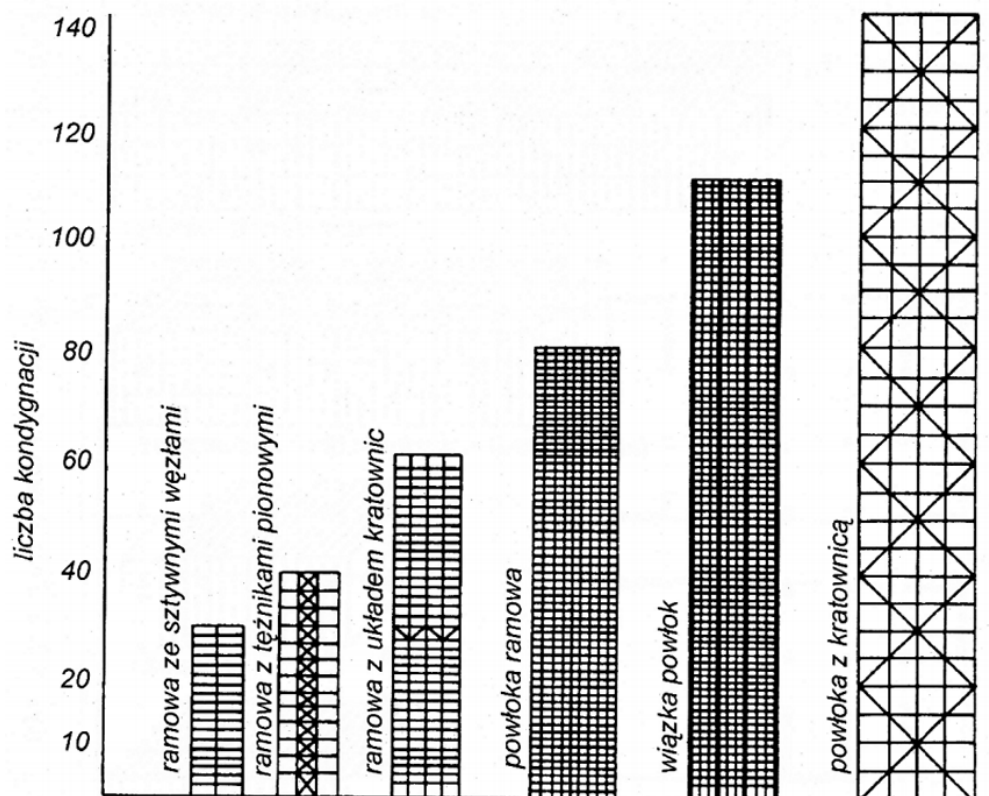


Rys. 4.2.2 Klasyfikacja budynków ze względu na przyjęty system konstrukcyjny oraz liczbę kondygnacji, budynki najwyższe

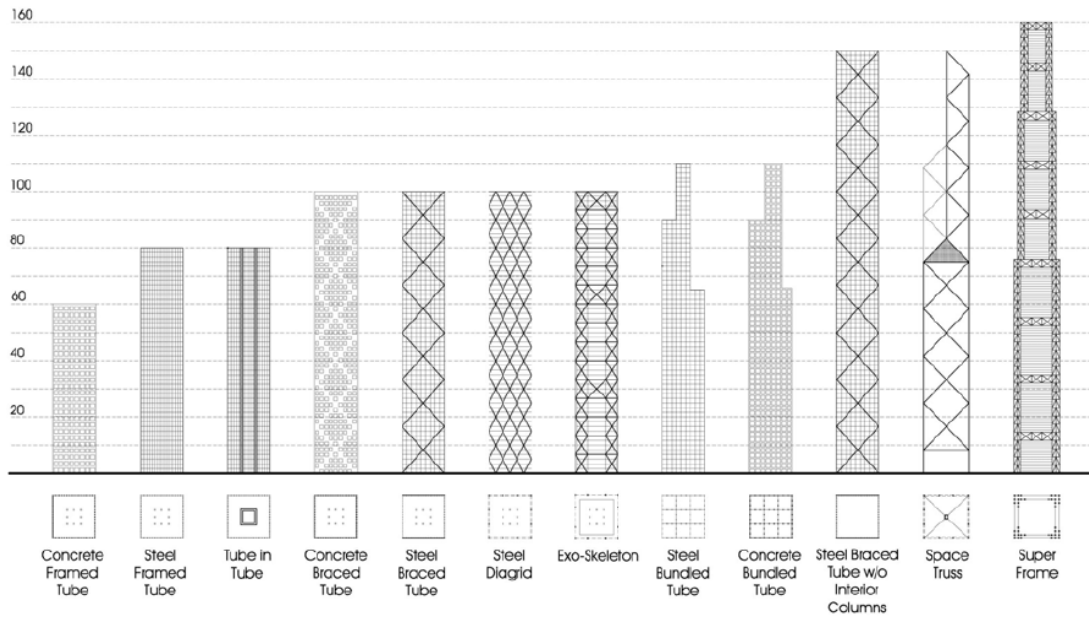
Źródło: [53]



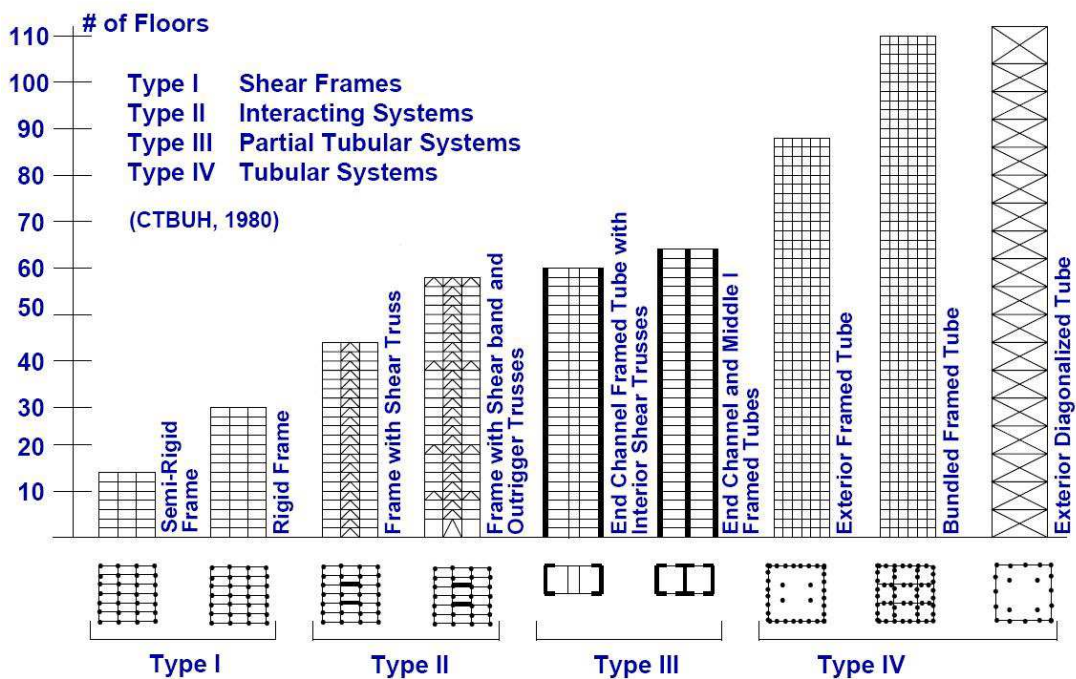
Rys. 4.2.3 Schematy klasycznych ustrojów nośnych budynków o głównej konstrukcji monolitycznej  
Źródło: [80]



Rys. 4.2.4 Schematy klasycznych ustrojów nośnych budynków o głównej konstrukcji stalowej  
Źródło: [80]



Rys. 4.2.5 Schematy zewnętrznych struktur budynków wysokich w odniesieniu do liczby kondygnacji  
Źródło: [2]



Rys. 4.2.6 Klasyczny podział budynków wysokich w odniesieniu do zastosowanego systemu konstrukcyjnego i liczby kondygnacji. Type I - konstrukcje ramowe, Type II- ramowe ze stratowaniami, Type III – układy powłokowe, Type IV- megastruktur  
Źródło: [2]

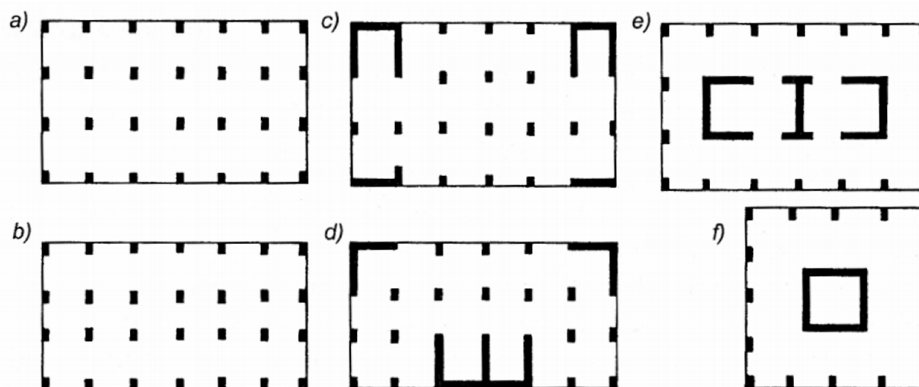
Tabela 3 Dobór ustrojów nośnych w porównaniu do liczby kondygnacji Źródło: [37]

Układy stężające		Liczba kondygnacji, wysokość budynku
<b>1. Płaskie</b>		
1.1. Ramowy	węzły sztywne	do 10 kond., $H < 2 B$
	węzły podatne	$H < 1,5 B$
1.2. Kratowy		do 30 kond.
1.3. Tarczowy	ściany murowane	do 6 kond.
	ściany żelbetowe	do 30 kond.
1.4. Mieszane		do 40 kond.
<b>2. Przestrzenne</b>		
2.1. Trzonowe		do 40 kond.
2.2. Z przestrzennymi ramami kratowymi		do 60 kond.
2.3. Powłokowe		50 – 110 kond.
2.4. Megakonstrukcje		do 150 kond.

#### 4.3. Analiza wybranej grupy obiektów posiadających ramowe systemy nośne

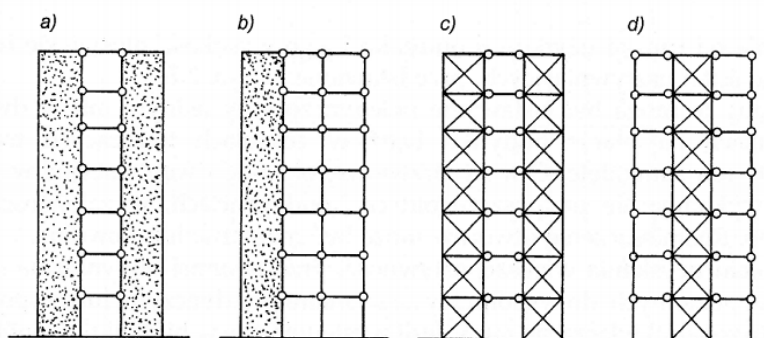
Typowy system konstrukcyjny oparty na ustroju szkieletowym był wykorzystywany dla wznoszenia najstarszych współcześnie obiektów wysokościowych, wynikało to w głównej mierze z dopuszczalnej wysokości całkowitej budynku oraz dostępnych technologii materiałowych [11,12,79]. Systemy ramowe bez odpowiedniego usztywnienia bryły budynku, poprzez zastosowanie sztywnego trzonu żelbetowego oraz stosownych tężników, były zbyt podatne na działanie obciążeń zewnętrznych. Do wspomnianej grupy obciążeń można zaliczyć wpływ sił wiatru w postaci ssania i parcia oraz wpływu zjawisk o charakterze dynamicznym i sił sejsmicznych.

Sztywność w klasycznym systemie ramowym zapewniają elementy nośne takie, jak rygle oraz słupy wraz z odpowiednimi połączeniami-węzłami. Analiza obiektów wysokich realizowanych od połowy XX wieku wykazała, iż konstrukcja ramowa była najczęściej wykonywana poprzez połączenie głównych elementów nośnych za pomocą węzłów sztywnych w ustrojach monolitycznych i stalowych oraz połączeń przegubowych w systemach prefabrykowanych betonowych i sprężonych. Ustroje ramowe budynków wysokich realizowano w postaci ram wielokondygnacyjnych płaskich lub przestrzennych (Rys. 4.3.1).



Rys. 4.3.1 Rzuty budynków szkieletowych: (a),(b) układy słupowo- płytowe, lub ramowe, (c), (d) układy ramowo-ścianowe, (e), (f) trzonowo-ramowe, lub trzonowo-powłokowe  
 Źródło: [32,80]

Realizacje coraz wyższych budynków, a tym samym powiększenie wartości obciążeń [50] działających na ustrój szkieletowy, spowodowały rozwój systemów ramowych poprzez projektowanie oraz realizację dodatkowych skartowań w postaci tężników umieszczonych w pasmach pionowych oraz w pasmach poziomych. Rozwinięciem przedstawionych rozwiązań były budynki z zastosowaniem tężników w pasmach mieszanych (Rys. 4.3.2).



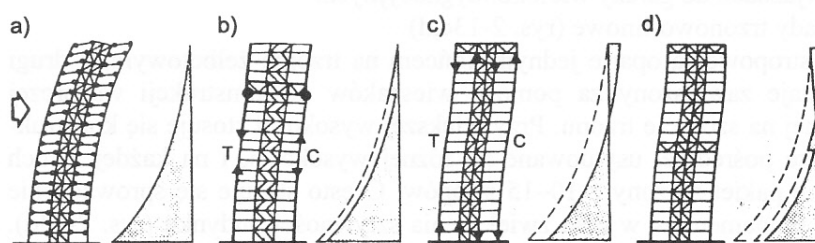
Rys. 4.3.2 Ustroje usztywniające budynki z ramami przegubowymi: (a); (b) układy ramowe ze ścianami usztywniającymi, (c); (d) układy z kratowymi tężnikami pionowymi  
 Źródło: [32]

Podstawowe cechy ustroju ramowego związane są z występowaniem rygli, które wystają poza zarys stropu lub są ukryte w przegrodzie poziomej. Ograniczenia rozpiętości rygli do wartości około  $7,5 \div 9$  metra [79] znacząco determinują kształtowanie rzutu poziomego budynku wysokiego, stając się głównym uwarunkowaniem strukturalnym w projektowaniu i realizacji obiektu. Spotyka się budynki wysokie zrealizowane w układzie bez ryglowym [79], jednakże są to



wyjątki potwierdzające regułę występowania ram z układem przestrzennym ryglowym.

Budynki projektowane w klasycznym ustroju ramowym, jak również w zmodyfikowanym ustroju zawierającym tężniki, mają dość ograniczoną możliwość w zakresie kształtowania form niekonwencjonalnych lub zakrzywionych. Szczególnie ma to znaczenie dla coraz wyższych budynków, co jest związane z potrzebą zwiększenia ich sztywności przestrzennej oraz ograniczenia wychylenia wierzchołka. Pozytywny wpływ stosowania tężników na mniejszą deformację obiektu ilustrują poniżej przedstawione schematy (Rys. 4.3.3).



Rys. 4.3.3 Schematy porównawcze odpowiedzi budynku wysokiego na obciążenia przy zastosowaniu indywidualnych przypadków tężników a) płaskie tężniki, b - d) z dodatkowymi wspornikami i rusztami

Źródło: [12]

Interesującym przykładem realizacji współczesnych budynków wysokich w układzie ramowym jest budynek Gulf Life Center<sup>15</sup> w Jacksonville w Stanach Zjednoczonych, którego wysokość wynosi 135 metrów przy 28 kondygnacjach nadziemnych. Budynek został zaprojektowany przez znanego architekta Welton`a Becketa i KBJ Architects. Po ukończeniu budowy w 1967 roku był to najwyższy budynek o konstrukcji prefabrykowanej betonowo-sprężonej. W 1993 roku obecny właściciel budynku przeprowadził renowację całego budynku motywując ją względami estetycznymi. Stowarzyszenie The American Institute of Architects's Florida Chapter nominowało w 2012 roku ten budynek do grona 100 najciekawszych architektonicznie budynków Florydy. Ukształtowany układ ramowy stanowi swego rodzaju rozwiązanie elewacji całego budynku oraz spełnia podstawową rolę nośną zapewniając sztywność przestrzenną. Typowa fasada

<sup>15</sup> Obecna nazwa budynku to Riverplace Tower

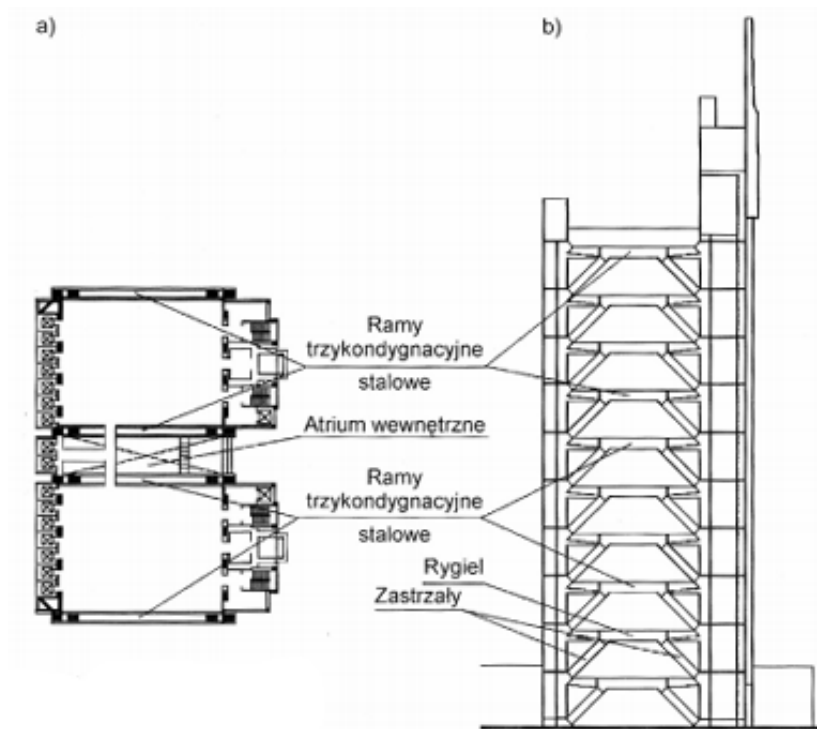
szklana została cofnięta nieco do wnętrza, a elementy słupów wraz z sprężonymi ryglami zostały wyeksponowane na zewnątrz (Rys. 4.3.4 a i b).



Rys. 4.3.4 a i b Widok elewacji budynku Riverplace Tower (a)  
zbliżenie na układ nośny ramowy (b)

Źródło: [i1]

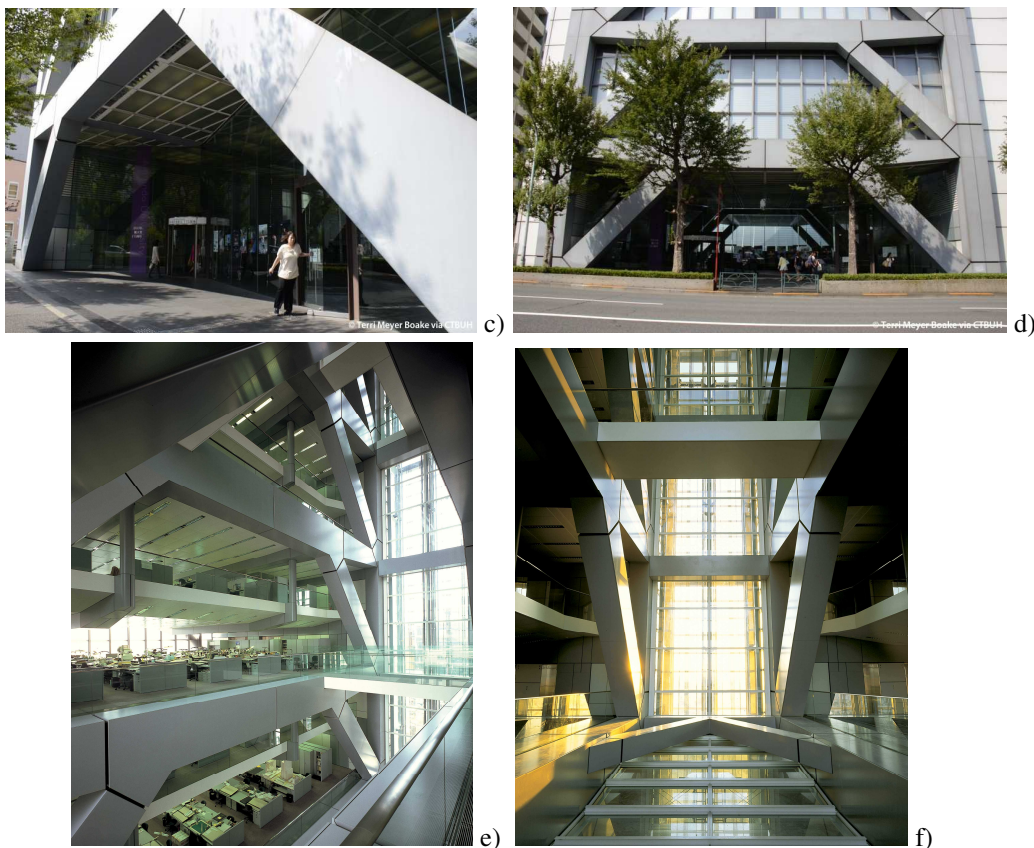
Kolejnym przykładem aplikacji systemu ramowego realizowanego przy wykorzystaniu konstrukcji monolitycznej jest Century Tower (Rys. 4.3.6 a, b, c, d, e, f) autorstwa znanego architekta brytyjskiego Normana Fostera. Budynek o wysokości 136 metrów, w którym zaprojektowano 21 kondygnacji nadziemnych oraz 2 kondygnacje podziemne znajduje się w Tokio. Rzut budynku oraz schemat ram nośnych, pokazany na Rys. 4.3.5 a i b, został całkowicie uwolniony od pośrednich podpór konstrukcyjnych. Projektanci konstrukcji, pochodzący z biura Ove Arup & Partners, zaprojektowali cztery ramy żelbetowe ustawione poprzecznie do głównej osi budynku. Uzupełnieniem podstawowego schematu ramowego są zastrzały ukośne, ograniczające ugięcia rygli, co pozwoliło zmniejszyć przekrój poprzeczny elementu. Słupy ram rozstawiono po zewnętrznym obrysie rzutu budynku w ścianach szczytowych oraz wzdłuż ścian wewnętrznego atrium. Ekspozycja ustroju nośnego na elewacji podobnie, jak w przypadku budynku Riverplace Tower, stała się strukturalną dominantą obiektu.



Rys. 4.3.5 a i b Rzut kondygnacji (a), szkic elewacji (b)  
 Źródło: [53]



Rys. 4.3.6 a i b Widok elewacji frontowej(a), widok ramy konstrukcyjnej na elewacji (b, c, d)  
 Źródło: [i1] Rys. 4.3.6 e, f. widok ram we wnętrzu budynku (e, f)  
 Źródło: [i2]



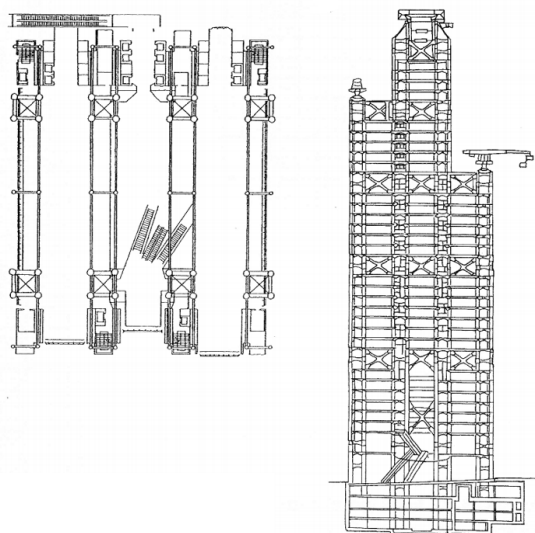
Rys. 4.3.6 c, d, e, f Widok elewacji frontowej(a), widok ramy konstrukcyjnej na elewacji (b, c, d)

Źródło: [i1] Rys. 4.3.6 e, f. widok ram we wnętrzu budynku (e, f)

Źródło: [i2]

Następną reprezentatywną aplikacją systemów ramowych w realizacji budynków wysokich jest bank HSBC w Hongkongu, zaprojektowany przez zespół architektów z Foster Associates przy udziale zespołu konstruktorów z Arup Associates. Budynek ukończony w 1985 roku pełni funkcję biurową, a cały ustrój konstrukcyjny został wykonany w stali. Wysokość budynku wynosi 179 metrów przy 43 kondygnacjach nadziemnych i 4 kondygnacjach podziemnych. Ustrój ramowy stalowy tworzy osiem słupów wielogałęziowych wykonanych z rur okrągłych i poziomych rygli, uwalniając wnętrze budynku od dodatkowych podpór konstrukcyjnych. Innowacyjnym rozwiązaniem konstrukcyjnym było zaprojektowanie 8 sekcji w postaci pionowych systemów ram Vierendeel'a, które w swoim założeniu mają zapewnić stateczność wielokondygnacyjnych układów ramowych w trakcie trzęsień ziemi. Wieżowiec został podzielony na pięć sekcji, w których podstawowa rama stalowa o wysokości dwóch kondygnacji podtrzymuje poprzez system podwieszni kilka kondygnacji użytkowych. Zaprojektowana w

budynku sekcja nr 1 mieści 8 kondygnacji, sekcja nr 2 to zespół 7 kondygnacji, sekcja nr 3 zawiera 6 kondygnacji, sekcja nr 4 posiada 5 kondygnacji, sekcja nr 5 to ostatnie 4 kondygnacje. Wielokondygnacyjne ramy stalowe mają różną wysokość mierzoną w pionie, co dodatkowo wpływa korzystnie na odbiór estetyczny budynku, który wydaje się przez to nieco wyższy. Schemat rzutu budynku wraz z przekrojem przedstawiono na rysunku Rys. 4.3.7.



Rys. 4.3.7 Schemat rzut ustroju ramowego stalowego oraz przekroju pionowego przez całą wysokość budynku

Źródło: [53]

Budynek jest przykładem zmodyfikowanego układu ramowego z wykorzystaniem elementów wieszarowych. Niewątpliwą zaletą zastosowania systemu ramowego jest uwidocznienie elementów stalowych w elewacji budynku. Wieżowiec zaprojektowano i zrealizowano zgodnie z założeniem, iż elementy strukturalne tworzą wyłącznie formę architektoniczną budynku wysokościowego. Zastosowanie elementów konstrukcyjnych wykonanych ze stali, widocznych na elewacji obiektu oraz w jego wnętrzach, dodatkowo podkreśla smukłość i lekkość budynku.

Cechą charakterystyczną tego budynku jest wysokie na 52 metry atrium, zdolne pomieścić ponad 3000 osób. Uwidocznienie systemu konstrukcyjnego wraz z zastosowaniem ustroju ramowo-wieszarowego pozwoliło na stworzenie budynku określanego mianem „ikony architektonicznej”. Wieżowiec (Rys. 4.3.8 a, b, c, d, Rys. 4.3.9 a, b) o powierzchni 99 000m<sup>2</sup> zgodnie z [53] otworzył nowy etap kształtowania budynków średniowysokich w tkance miejskiej.



a)



b)



c)



d)

Rys. 4.3.8 a, b, c, d Widok elewacji budynku(a, b, c) widok detalu elementu stalowego (d)  
 Źródło: [i1, i2]



a)



b)

Rys. 4.3.9 a i b Widok wnętrza budynku (a, b)  
 Źródło: [i1, i2]

Następnym przykładem zastosowania ustroju ramowego stalowego jest konstrukcja budynku „Hotel de las Artes” (Rys. 4.3.10 a, b, c, d) w Barcelonie. Obiekt został zaprojektowany przez biuro SOM (Skidmore, Owings & Merrill) i oddany do użytku w 1992 roku. Wysokość budynku wynosi 154 metry, w tym zaprojektowano 44 kondygnacje nadziemne i 2 kondygnacje podziemne. Podobnie jak w przedstawionych poprzednio przykładach, w budynku Hotelu De Las Artes układ ramowy został uwidoczniiony w elewacji budynku poprzez zabieg cofnięcia ściany elewacji do wnętrza o około 1,5 metra. Odsunięcie ustroju stalowego od ściany osłonowej pozwoliło uzyskać wymaganą ognioodporność obiektu. Obiekt zrealizowano między innymi na potrzeby przeprowadzenia wielu badań i testów. Zastosowany zabieg techniczny w budynku odzwierciedla przedstawione na rysunku Rys. 4.3.3 schematy budynków o konstrukcji ramowej wspomaganiej poprzez układ tężników. Stężenia krzyżowe zastosowano zarówno w pasach pionowych jak i w trzech pasach poziomych, co znacznie poprawiło sztywność przestrzenną całego budynku. Przyjęty system ram stalowych współpracuje z konstrukcją stropów zamontowanych na ruszcie stalowych belek-rygli mocowanych do podstawowej ramy nośnej wieżowca. W przedstawionym przykładzie konstrukcja pełni funkcję ustroju nośnego przenoszącego obciążenia pionowe i poziome oraz stała się determinantą strukturalną formy architektonicznej tego budynku wysokiego.



Rys. 4.3.10 a, b, c, d Widok stalowej ramy zewnętrznej na elewacji budynku (a, c, d) oraz uzyskana przestrzeń za ustrojem nośnym (b)

Źródło: [i3, i4]

Przedstawione powyżej realizacje współczesnych budynków wysokich o konstrukcji ramowej, a w szczególności prezentacja determinant konstrukcyjnych wpływających na formę architektoniczną tych obiektów, są skutkiem wieloletnich prac badawczo-rozwojowych nad tymi układami nośnymi. W przedstawionej analizie, będącej głównym elementem tej rozprawy doktorskiej, należy wspomnieć

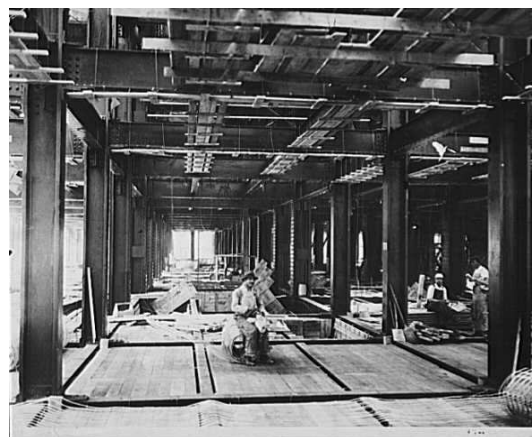


obowiązkowo o ikonie budynków wysokich jakim jest Empire State Building, który jest jednym z najbardziej znanych symboli miasta Nowy Jork.

Budynek powstał w miejscu wyburzonego hotelu Waldorf-Astoria w 1931r według projektu architektonicznego Shreve, Lamb & Harmon Associates. Empire State Building (Rys. 4.3.11 a), posiada 102 kondygnacje i jego wysokość wynosi 381 metrów, a z wieżą telewizyjną liczy aż 449 metrów. Do roku 1972, czyli przez ponad 40 lat, był najwyższym budynkiem na świecie do momentu wybudowania północnej wieży World Trade Center mającej wysokość 417 metrów. Ustrój nośny stanowi szkielet stalowy (Rys. 4.3.11 b oraz Rys. 4.3.12), na który zużyto ponad 50 tysięcy ton stali. Stalowy szkielet utworzyło 210 pionowych kolumn łączonych nitami. Dwanaście z nich biegło przez całą wysokość bryły budynku, reszta posiada wysokość od 6 do 8 kondygnacji. Charakterystyczna fasada budynku odzwierciedla wymagania zawarte w kodeksie urbanistyczno-budowlanym przygotowanym specjalnie dla Manhattanu.



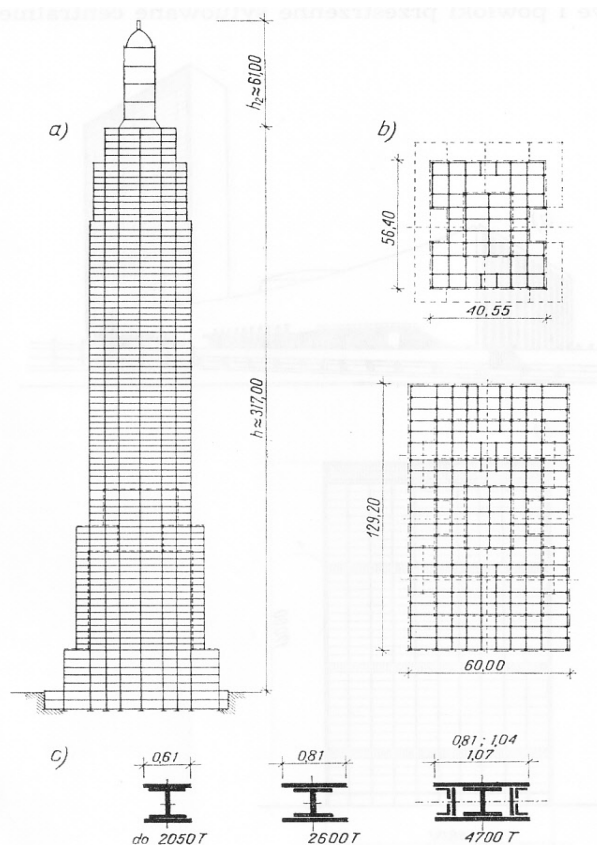
a)



b)

Rys. 4.3.11 a i b Sylwetka Empire State Building (a) Źródło:[i1], fotografia archiwalna ramowej konstrukcji stalowej budynku w trakcie budowy (b)

Źródło: [i9]



Rys. 4.3.12 Schemat konstrukcyjny Empire State Building. przekrój pionowy (a), przekroje poziome na 2 i 22 kondygnacji (b), geometria słupów stalowych (c)  
 Źródło: [11]

Budynek, który między innymi jest symbolem Nowego Jorku został zaprojektowany i zrealizowany w stylu *Art Deco*, którego bryła oraz forma zostały podporządkowane ramowej konstrukcji nośnej opisywanej w literaturze przedmiotu, jako konstrukcja nitowana.

**Krótkie podsumowanie:**

Rozwój systemów konstrukcyjnych budynków wysokich nieodłącznie wiąże się z jedną z ich podstawowych cech, jaką jest wysokość ponad otaczającym terenem. Pierwszym układem konstrukcyjnym, który pozwolił na wznoszenie coraz wyższych obiektów był ustrój szkieletowy. Dominującym materiałem budowlanym w początkowym okresie stosowania systemu było żeliwo, a później stal. Obecnie wznoszone budynki wysokie w omawianym systemie są coraz częściej realizowane również w konstrukcjach monolitycznych, kompozytowych lub mieszanych.

Aplikacja systemów ramowych w obiekcie wysokościowym staje się znaczącą determinantą kształtowania formy budynku.

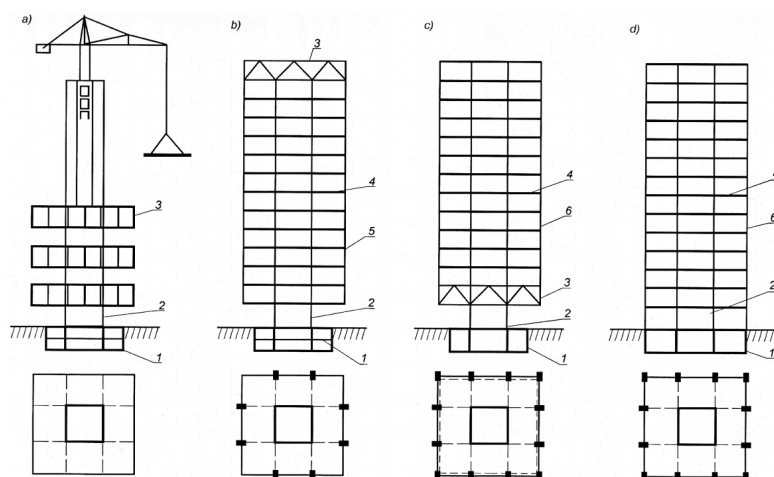
#### **4.4. Analiza wybranej grupy obiektów posiadających trzonowe systemy nośne**

Wraz ze wznoszeniem coraz wyższych budynków pojawił się problem z zapewnieniem obiektowi wymaganej sztywności przestrzennej oraz zmniejszenia wychyleń górnych kondygnacji oraz samego wierzchołka. Dodatkowo rosnące wymagania przeciwpożarowe oraz funkcjonalne doprowadziły do ewolucji systemów konstrukcyjnych opartych na sztywnym elemencie, jakim byłby trzon żelbetowy. Budynki trzonowe są realizowane przy użyciu materiałów takich jak beton, stal, choć najbardziej dominującym materiałem ustroju nośnego jest układ mieszany betonowo-stalowy. Wynika to z najbardziej racjonalnych przesłanek związanych z wykorzystaniem właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych poszczególnych materiałów. Budynki trzonowe realizowane są do wysokości 60 kondygnacji nadziemnych [53], choć bardziej restrykcyjne wymagania ograniczające wysokość obiektów do 40 kondygnacji opisano w pracy [11,12, 37].

Od przedstawionych powyżej założeń ograniczających wysokość budynku widoczne są odstępstwa związane z realizacją współczesnych struktur budynków wysokościowych, co zostanie przedstawione na dodatkowych przykładach. Ewolucja systemu konstrukcyjnego opartego na trzonie żelbetowym doprowadziła do powstania jego wielu modyfikacji i odmian (Rys. 4.4.1 oraz Rys. 4.4.2).

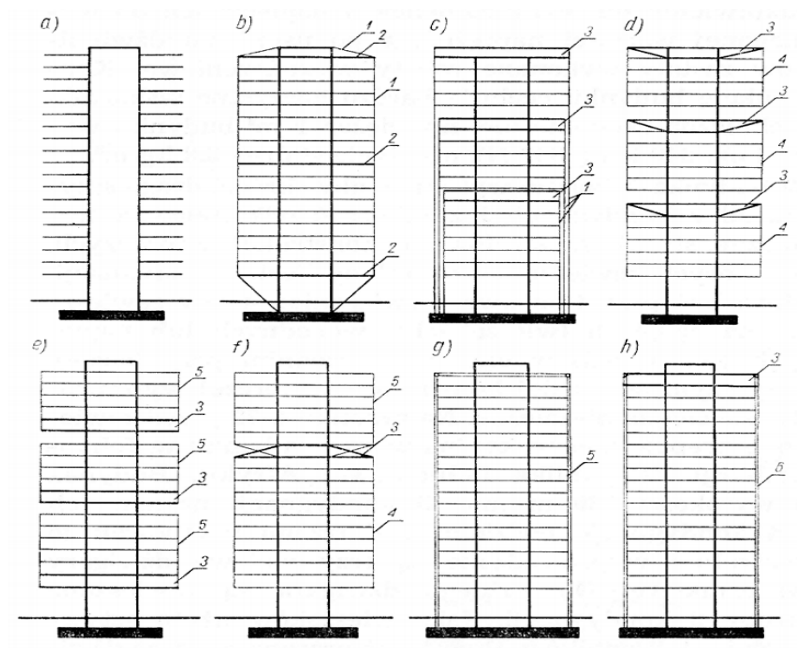
Do podstawowych typów ustrojów trzonowych można zaliczyć:

- a) klasyczny układ trzonowo – wspornikowy (Rys. 4.4.1– a)
- b) modyfikowany układ wspornikowo – słupowy (Rys. 4.4.1– c),  
(Rys. 4.4.1– e)
- c) ustroje trzonowo-wieszarowe (Rys. 4.4.2 – b, c, d)
- d) ustrój trzon w trzonie
- e) trzonowo-ścianowy
- f) trzonowo-szkieletowy



Rys. 4.4.1 Schemat klasycznych form budynków trzonowych: a) trzonowo-wspornikowy, b) trzonowo-wieszakowy, c) trzonowo-podporowy (słupy ustawione na dźwigarach nośnych), d) trzonowo-podporowy (słupy ustawione na fundamentach)  
1-fundament, 2-trzon, 3-dźwigary nośne, 4-stropy, 5-wieszak, 6-słup  
Źródło:[79, 80]

Rozbudowane schematy klasycznych form i geometrii budynków trzonowych (Rys. 4.4.2) zaprezentowano szczegółowo w pracy [11].



Rys. 4.4.2 Rozbudowany schemat klasycznych form i geometrii budynków trzonowych: a) ze stropami wspornikowymi, b) i c) ze stropami zawieszonymi na ciężnach, d) ze stropami zawieszonymi na wieszakach, e) ze stropami wspartymi na słupach, które są wsparte na rusztach, f)układ mieszany, g) układ z przegubowymi słupami, h) układ ze sztywnym zamocowaniem słupów.  
1-ciężna, 2-szytne stropy, 3-szytne ruszty (wsporniki), 4-wieszaki, 5-słupy przegubowe, 6-słupy sztywne (ramy)

Źródło: [11]

Po przeprowadzeniu wielu własnych analiz zawartych w niniejszej dysertacji przedstawiony powyżej tradycyjny podział ustrojów trzonowych w wyniku ewolucji stosowanych rozwiązań powinien zostać zmodyfikowany.

Systemy trzonowo-wieszarowe, w których stosuje się elementy rozciągane w postaci lin, ciągów, splotów linowych oraz prętów rozciąganych, powinny zostać zdefiniowane osobno ze względu na swoje specyficzne i skomplikowane działanie statyczno-dynamiczne. W związku z powyższym systemy trzonowo-wieszarowe zostaną opisane w osobnym rozdziale o nr 4.5. Kolejną modyfikacją, jaka powinna zostać wprowadzona do klasycznego podziału systemów trzonowych związaną z ewolucją form architektonicznych, jest ta dotycząca ustrojów określanych jako „trzon w trzonie”. Pomimo zbliżonej względem rozwiązania klasycznego, geometryczna forma ustroju „trzon w trzonie” wymaga odrębnej analizy. Współczesne budynki wysokie, w których strukturalne determinanty systemu „trzon w trzonie”, często również określanego jako system dwupowłokowy, stają się indywidualnym rozwiązaniem architektoniczno-konstrukcyjnym obiektu. Zrealizowana liczna grupa współczesnych budynków wysokich z zastosowaniem zmodyfikowanego klasycznego systemu trzonowego otworzyła nowy etap projektowania architektoniczno-konstrukcyjnego związanego ze sposobem przekazywania obciążeń pionowych i poziomych na fundament.

W klasycznych formach budynków trzonowych wykorzystuje się trzon żelbetowy jako element o największej sztywności. Najbardziej racjonalną lokalizacją trzonu jest sytuowanie go symetrycznie względem rzutu budynku. Ewolucja oraz rozwój form architektonicznych budynków wysokich spowodował modyfikację również i w tym zakresie. W niniejszej dysertacji dodatkowo przedstawiono przykłady obiektów realizowanych, w których trzon żelbetowy jest umiejscowiony niesymetrycznie lub nawet poza obrysem budynku. Przyjęte rozwiązanie powoduje komplikacje w analizie statyczno-wytrzymałościowej ze względu na powstanie zjawiska „skręcenia” budynku i w konsekwencji pojawienia się dodatkowych sił wewnętrznych w elementach nośnych.

Pierwotnie, systemy konstrukcyjne budynków wysokich opierały się na trzonie, którego geometria była zbliżona do ogólnej postaci rzutu całego budynku.

W obecnych realizacjach widać dalsze zachowanie pierwotnych założeń technicznych, a wyjątki mogą jedynie potwierdzać przyjętą regułę.

Podstawowe formy geometryczne trzonów:

- a) o rzucie poziomym w postaci kwadratu
- b) o rzucie poziomym w postaci prostokąta
- c) o rzucie poziomym w postaci koła
- d) o rzucie poziomym w postaci trójkąta

Realizacja budynku wysokiego z dwoma lub kilkoma trzonami żelbetowymi jest wskazana pod względem konstrukcyjnym, przeciwpożarowym oraz instalacyjnym. Takie rozwiązanie pozwala modyfikować architektonicznie formę budynku wysokiego tworząc obiekty „ikoniczne” przy zastosowaniu rozwiązań ekologicznych „*eko-tech*” lub wysoko technologicznych „*high-tech*”.

Kolejną grupą modyfikacji dotyczących trzonu jest zmniejszenie jego powierzchni na najwyższych kondygnacjach oraz jego częściowego przemieszczenia się względem ogólnej formy rzutu budynku. Wprowadzenie takich zmian w budynku powoduje zmniejszenie sztywności przestrzennej oraz konieczność zaprojektowania dodatkowych elementów wzmacniających.

W budynkach wysokościowych o konstrukcji trzonowej istotnym parametrem definiującym sztywność obiektu są proporcje wysokości budynków do wielkości najmniejszego boku trzonu. Podana w pracach [53,60] zależność  $H/B < 17 \div 19$ , gdzie H- oznacza wysokość budynku, a B - długość krótszego boku trzonu ma odzwierciedlenie we współczesnych realizacjach.

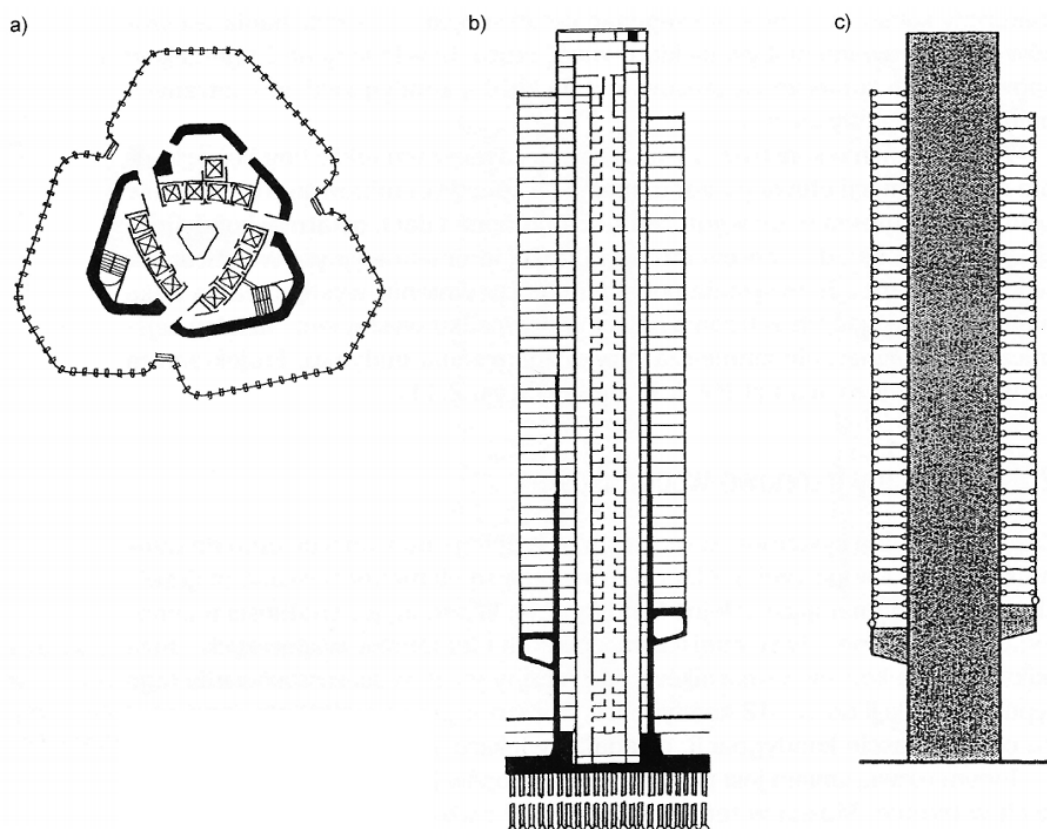
W początkowych okresach realizacji budynków podana zależność była definiowana bardziej rygorystycznie i wynosiła  $H/B = 7 \div 12$  [11]. Smukła geometria trzonów przyczynia się do obniżenia sztywności całego budynku, co będzie wymagać zwiększonej współpracy z konstrukcją zewnętrzną obudowy obiektu.

Przykładem odzwierciedlającym klasyczny układ trzonowo – wspornikowy budynku jest Westminister Bank w Londynie<sup>16</sup> (Rys. 4.4.3 a, b, c, Rys. 4.4.4 a i b, Rys. 4.4.5 a i b). Projektantem branży architektonicznej był R. Seifert, a branży

---

<sup>16</sup> Pierwotna nazwa to NatWest Tower a obecna nazwa budynku to Tower 42

konstrukcyjnej zespół Pell Frischmann & Partners. Budynek o wysokości 183 metrów, który zawiera 45 kondygnacji nadziemnych oraz 3 kondygnacje podziemne, został zaprojektowany w postaci trój podzielnej bryły, która dodatkowo została zaakcentowana różną wysokością wierzchołka budynku. Przyjęty system konstrukcyjny wymusił na projektantach dobór wielkości trzonu o znacznej powierzchni sięgającej aż 30% całkowitej powierzchni rzutu wieżowca [53]. Głównym elementem ustroju nośnego są trzy skrzynie żelbetowe, na których wsparto lekką konstrukcję stalową ściany osłonowej oraz gęsto rozmieszczonego układu rygli z płytami stropowymi wykonanymi z betonu o niskim ciężarze objętościowym, które były wylewane na blachach trapezowych.



Rys. 4.4.3 a, b, c Budynek Tower 42 w Londynie. a) rzut kondygnacji typowej, b) przekrój pionowy przez budynek, c) zasada pracy ustroju nośnego

Źródło: [53]

Gęsty układ słupów stalowych przenosi obciążenia na wspornik poszczególnej sekcji budynku. Rygle stalowe stropów oraz wspomniane wsporniki monolityczne są sztywno zamocowane w żelbetowym trzonie, który przekazuje obciążenia poprzez fundament na podłoże gruntowe. Przedstawiony na rysunku

(Rys. 4.4.3 c) schemat przekroju pionowego budynku wskazuje, iż projektanci nie zastosowali wzdłuż jego wysokości wsporników pośrednich, dzięki temu widok elewacji oraz podział architektoniczno-konstrukcyjny budynku nie został zaburzony. Zastosowanie uwypuklonych słupów konstrukcji stalowej w elewacji oraz uwolnienie części dolnej budynku od konstrukcji podpierającej poprzez zastosowanie skrzyń żelbetowych jest przykładem zastosowania strukturalnych determinant w formie architektonicznej budynku.

Systemy trzonowo-wspornikowe budynków odznaczają się często regularnymi i prostopadłościennymi formami architektonicznymi budynków wysokich.

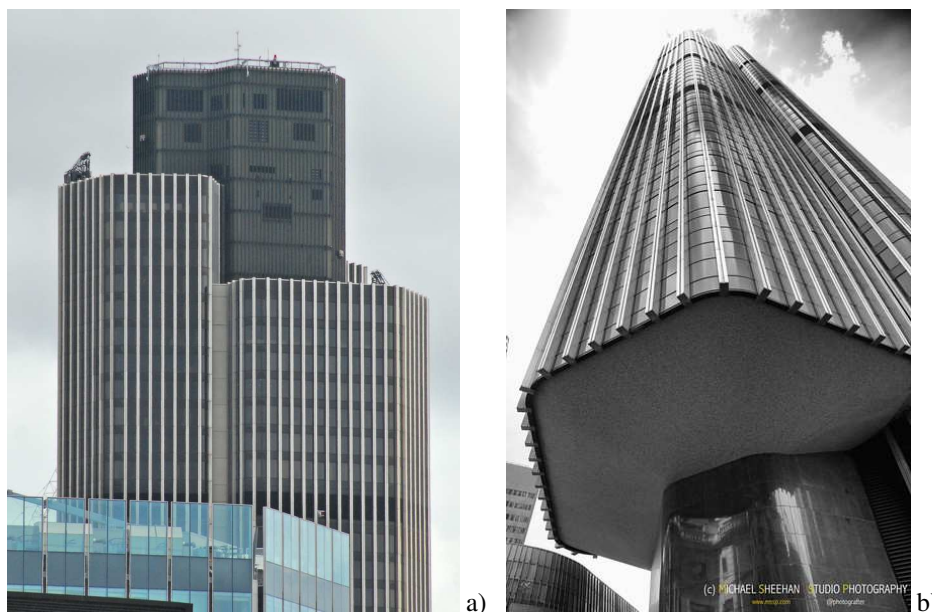
W przedmiotowym przypadku udało się tego uniknąć poprzez różnicowanie wysokości poszczególnych sekcji oraz modyfikację rzutu kondygnacji powtarzalnej (Rys. 4.4.3 a). Rzut poziomy budynku oraz złagodzone krawędzie załamania elewacji uwzględniają podstawowe zagadnienia związane z wpływem sił aerodynamicznych działających na obiekt. Odpowiednie ukształtowanie bryły budynku, poprzez ograniczenie liczby ostrych krawędzi, prowadzi do zmniejszenia wartości ekstremalnych sił zewnętrznych [18,19].



Rys. 4.4.4 a i b Budynek Tower 42 (a, b) widok elewacji budynku

Źródło: [i5, i6]





Rys. 4.4.5 a i b Budynek Tower 42 (c) widok podziału wierzchołka budynku na trzy sekcje,  
(d) widok ukształtowanego parteru poprzez zastosowany wspornik  
Źródło: [i5, i6]

Typowe rozwiązania konstrukcji trzonowo-wspornikowych, w których stropy zostały zaprojektowane jako elementarny układ wspornikowy, są przykładami bardzo rzadko realizowanymi. Wynika to w głównej mierze z tego, iż funkcję stateczności i sztywności przejmuje jedyny element nośny, jakim jest masywny trzon żelbetowy. Zamocowane wspornikowo stropy o wysięgu od 6 do 8 metrów do konstrukcji trzonu powodują powstanie dużych sił wewnętrznych w przekroju ściany żelbetowej, która z tych powodów będzie musiała posiadać znaczną grubość [53]. Korzyścią z przyjęcia rozwiązania trzonowo-wspornikowego jest ograniczenie linii pionowych podziałów widocznych na elewacji budynku, powstałych w wyniku rozmieszczenia słupów nośnych, jak ma to miejsce w systemie trzonowo-szkieletowym.

Reprezentatywnym przykładem realizacji omówionego systemu konstrukcyjnego jest budynek o funkcji biurowej o nazwie Treasury Building<sup>17</sup> (Rys. 4.4.6 a, b, Rys. 4.4.7) w Singapurze, który powstał pod koniec lat 80-tych XX wieku. Projektantem architektury był H. Stubbins - The Stubbins Associates. Budynek o wysokości 235 metrów, posiadający 52 kondygnacje nadziemne oraz 5 podziemnych, uzyskuje wymaganą stateczność poprzez trzon, który ma kształt

<sup>17</sup> dodatkowa nazwa budynku to 8 Shenton Way

zbliżony do rzutu poziomego budynku, jakim jest koło. Szerokość trzonu wynosi 23 metry przy bardzo grubych ścianach wynoszących maksymalnie 160 centymetrów.

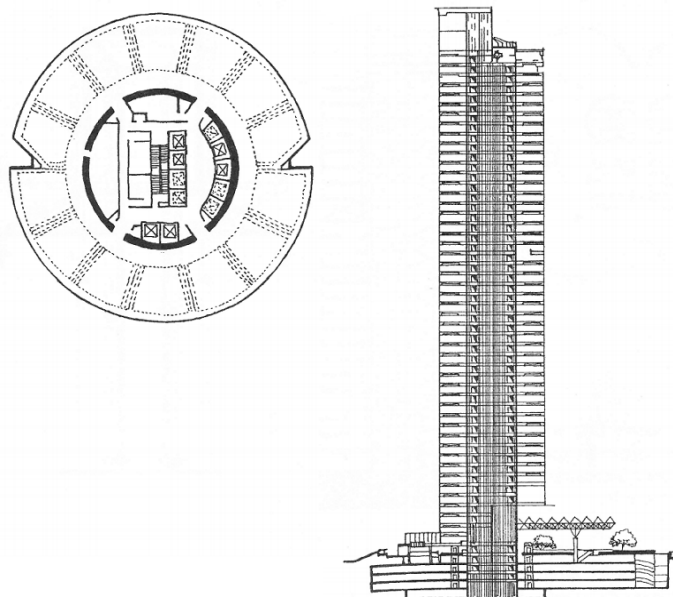
Zaprojektowane stropy o wysięgu 11,6 metra w klasycznych rozwiązaniach żelbetowych nie byłyby w stanie przenosić pionowych obciążeń użytkowych. W związku z tym projektant zastosował rozwiązanie zmodyfikowane, w którym zaproponował promienisty układ belek wspornikowych spiętych pierścieniową belką krawędziową, a stropy monolityczne pozostały jako uzupełnienie konstrukcji stalowej. Klasyczne rozwiązanie trzonowo-wspornikowe jest bardzo rzadko stosowane ze względu na skomplikowane rozwiązania konstrukcyjne. Ogromne koszty budowy systemu trzonowo-wspornikowego nie rekompensują zalet powstania budynku wysokiego o charakterze „ikonicznym” lub nawet o dużym potencjale użytkowym. Forma Tresury Building została zaprojektowana w postaci smukłego walca z dwoma wewnętrznymi wycięciami przebiegającymi przez całą wysokość budynku.

Niewątpliwą korzyścią dla konstrukcji budynku wynikającą z kształtu były, w której ograniczono do minimum ostre krawędzie, jest ograniczenie wpływu sił poziomych związanych z obciążeniem wiatrem. [18,19,40,41,42,43].



Rys. 4.4.6 a i b Budynek Tresury Building. a, b) – widok elewacji

Źródło: [i1]



Rys. 4.4.7 Budynek Tresury Building  
 rzut poziomy i przekrój pionowy budynku  
 Źródło: [53]

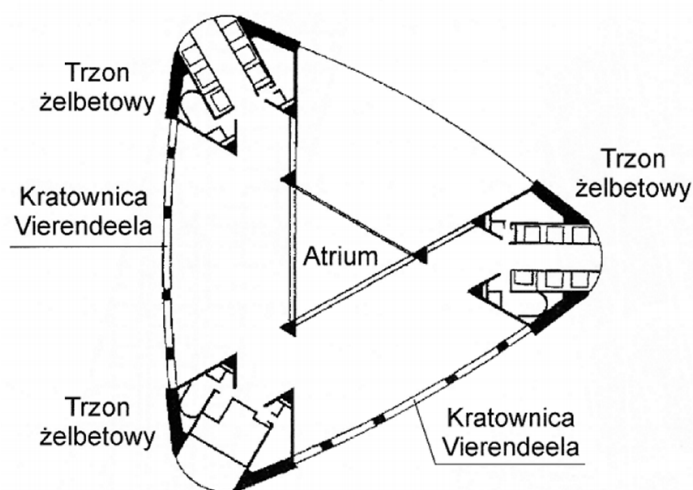
Ograniczenia technologiczne i konstrukcyjne systemu trzonowo-wspornikowego spowodowały dalszy rozwój układów nośnych budynków. Obecnie jednym z najpopularniejszych systemów konstrukcyjnych europejskich budynków wysokich jest ustrój trzonowo-szkieletowy.

Budynki wysokie w Europie są znacznie niższe niż ich odpowiedniki w Stanach Zjednoczonych czy na Bliskim Wschodzie lub Azji. Ustrój trzonowo-szkieletowy pozwala na kształtowanie budynków zawierających do 50 kondygnacji nadziemnych [53], które należą do najliczniejszej grupy w rodzinie wszystkich budynków wysokościowych. Stropy między kondygnacyjne o konstrukcji żelbetowej lub stalowo-żelbetowej, będące rozwiązaniem technicznym poziomej sztywnej tarczy, pomagają w uzyskaniu większej sztywności przestrzennej budynku. Konstrukcja szkieletowa umiejscowiona na krawędzi stropów ma za zadanie przenosić obciążenia pionowe ze stropów, a trzon żelbetowy zapewnia sztywność przestrzenna oraz dodatkowo przenosi siły pionowe.

Wyróżniającym się przykładem obrazującym rozbitcie centralnego trzonu obiektu na kilka elementów składowych oraz przyjętym modelem konstrukcji trzonowo-szkieletowej jest budynek Commerzbank we Frankfurcie nad Menem.

Projektantem biurowca o wysokości 259 metrów jest brytyjski architekt Norman Foster, za projekt konstrukcji budynku odpowiadało biuro Ove Arup.

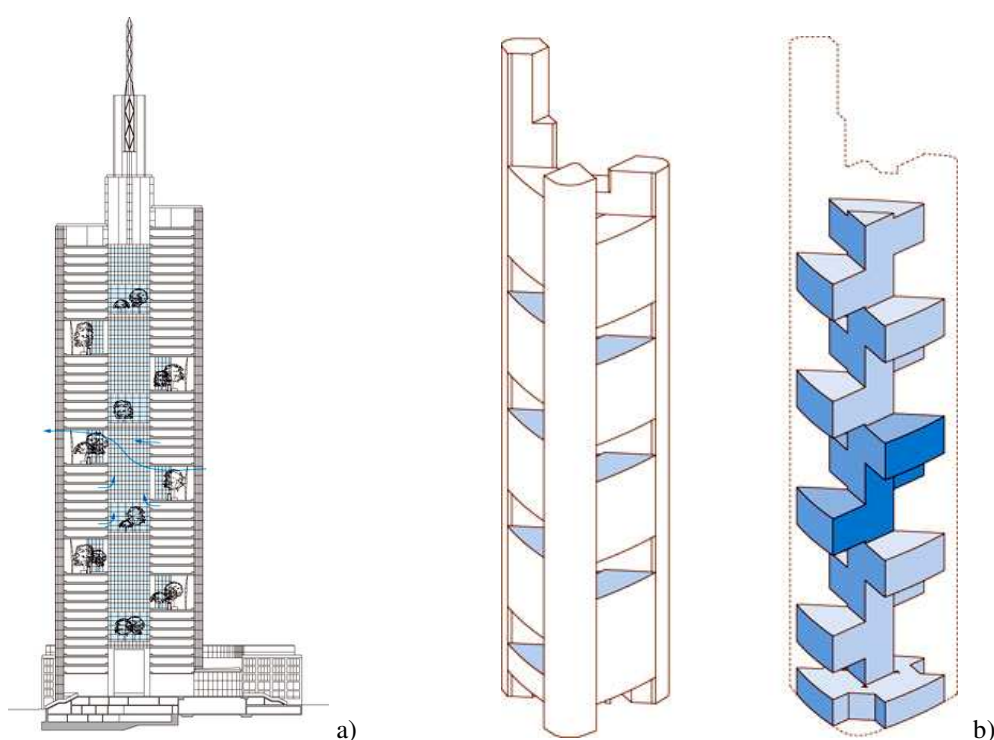
Budynek jest klasycznym przykładem budynków atrialnych i często jest nazywany prekursorem myśli "ekologicznej" dla obiektów wysokościowych. Budynek zaprojektowany został na planie trójkąta równobocznego w taki sposób, aby zaokrąglone narożniki pełniły funkcję trzech identycznych trzonów zapewniając równomierny poziom sztywności dla całego obiektu. W zespole zaprojektowanych trzonów umiejscowiono windy, klatki ewakuacyjne, sanitariaty, a także mniejsze sale konferencyjne. Rozwiązanie techniczne związane z rozbięciem trzonów nie zapewniałoby prawidłowej pracy ustroju nośnego całego budynku gdyby nie wzajemne połączenie ich ze sobą za pomocą belek-ram typu Vierendeel'a. Schemat współpracy elementów nośnych budynku przedstawia rysunek Rys. 4.4.8.



Rys. 4.4.8 Budynek Commerzbank. Schemat rzutu budynku i zasada współpracy elementów nośnych  
Źródło: [53]

Aerodynamiczny kształt narożników budynku powstał w wyniku poszukiwania najlepszej formy wieżowca, która zapewni ograniczenie negatywnego wpływu obciążenia wiatrem na elementy nośne obiektu oraz w celu zniwelowania niekorzystnego wpływu ciśnienia powietrza na skuteczność działania naturalnej wentylacji realizowanej poprzez elewację dwupowłokową. Budynek posiadający 56 kondygnacji nadziemnych oraz 2 podziemne przy rozbięciu trzonu na 3 osobne części został posadowiony na 111 palach o średnicy około 1,8 metra i długości 50 metrów.

Płyta oczepowa została zaprojektowana jako fundament o średniej grubości wynoszącej około 3 metrów. Konstrukcja ram o rozpiętości 36 metrów oraz wysokości odpowiadającej 8 kondygnacjom została sztywno połączona do żelbetowych trzonów budynku. Pomiędzy zaprojektowanymi powierzchniami biurowymi pozostawiono wolne przestrzenie przeznaczone na wewnętrzne ogrody. Pomieszczenia z roślinnością wraz ze wzrostem wysokości wieżowca zmieniają położenie na rzucie budynku co cztery typowe kondygnacje, tworząc efekt zmiany geometrii opartej na zasadzie „spirali” [53]. Przedstawiony układ funkcjonalny budynku obrazuje rysunek Rys. 4.4.9 a i b.



Rys. 4.4.9 a i b Budynek Commerzbank. Układ kondygnacji biurowych oraz ogrodów – (a) schemat blokowy obrazujący efekt „spirali” – (b)

Źródło: [i7]

Przyjęte rozwiązania architektoniczne oraz konstrukcyjne pozwoliły projektantom na stworzenie budynku odzwierciedlającego pojęcie „ikony” wieżowca, który jest rozpoznawalnym symbolem inwestora i miejsca gdzie został wybudowany. Prawidłowe relacje zachodzące w budynku pomiędzy formą architektoniczną, a zastosowanymi rozwiązaniami technicznymi przedstawiają poniżej kolejne części Rys. 4.4.10 a, b, c, d.



Rys. 4.4.10 Budynek Commerzbank. (a, b) widok elewacji wraz widocznym podziałem zgeometryzowanej elewacji. (c) widok na przeszklone wewnętrzne atrium. (d) widok odzwierciedlający wielkość przestrzeni we strefie wejściowej

Źródło: [i1]

Kolejnym przykładem ciekawej aplikacji systemów trzonowo-szkieletowych jest wieżowiec o funkcji mieszkalnej zlokalizowany w Chicago o nazwie Lake Point Tower (Rys. 4.4.10). Autorem projektu architektonicznego jest biuro Schipporeit-Heinrich Associates, a systemu konstrukcyjnego William Schmidt & Associates. Budynek o 70 kondygnacjach i liczący 196 metrów wysokości został wybudowany w 1968 roku w całości jako konstrukcja monolityczna. Stropy między kondygnacyjne zaprojektowano o grubości 20 centymetrów, które opierają się na gęstej siatce słupów oraz ścianach centralnego, trójkątnego trzonu wewnętrznego. Schemat rzutu powtarzalnej kondygnacji przedstawiono na Rys. 4.4.11 a.

Obiekt odznacza się ciekawą formą architektoniczną, którą można porównać do innych współcześnie wybudowanych budynków wysokich takich jak, Burj Khalifa w Dubaju oraz Canadian National Tower w Toronto [89].



Rys. 4.4.11 Budynek Lake Point Tower. (a) rzut kondygnacji powtarzalnej Źródło: [79]  
(b, c, d) widok elewacji budynku  
Źródło: [i1]

Interesującym przykładem aplikacji omawianego systemu konstrukcyjnego, który można rozpatrywać jako pozytywny przykład strukturalnej determinanty formy architektonicznej są budynki Marina City 1 i 2 (Rys. 4.4.12 a i b) w Chicago zaprojektowane przez architekta Bertranda Goldberga w 1959 roku. Kompleks obejmuje dwie bliźniacze wieże o wysokości 179 metrów i mające rzut poziomy w postaci koła o średnicy w części garażowej 39 metrów, a w części mieszkalnej średnicę 42 metrów.

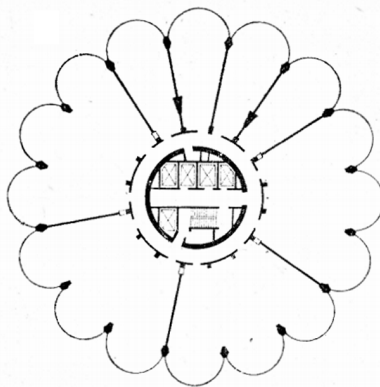
Układ konstrukcyjny każdej z wież stanowi masywny trzon i słupy ustawione po obwodzie, połączone płytą grubości 12,5cm (Rys. 4.4.13), która opiera się na żebrach usytuowanych promieniście. Grubość ścian trzonu zmienia się w granicach od 30 centymetrów do 75 centymetrów. Budynek został wykonany w całości w konstrukcji żelbetowej. Dolnych 20 kondygnacji przeznaczonych jest wyłącznie na parkingi i garaże. Charakterystyczną cechą obiektów są wypukłe balkony tworzące unikatową formę wieżowca.



Rys. 4.4.13 a i b Budynki Marina City 1 i 2 w Chicago, widok elewacji budynku (a,b)

Źródło: [i1]





Rys. 4.4.13 Budynki Marina City 1 i 2w Chicago, rzut kondygnacji typowej  
Źródło: [79]

Wieże mieszkalne Marina City zostały nagrodzone przez nowojorską Kapitułę Amerykańskiego Instytutu Architektów w 1965 roku za ich innowacyjność rozwiązań architektonicznych i konstrukcyjnych.

Współczesnym przykładem ciekawej aplikacji systemu trzonowo-szkieletowego jest jeden z najwyższych budynków w Szwecji, wykonany w Malmö, posiadający wysokość 190 metrów i liczący 54 kondygnacje nadziemne i 2 podziemne. Obiekt o nazwie Turning Torso (Rys. 4.4.14 a, b, c, d) zaprojektował architekt Santiago Calatrava przy porcie morskim i stanowi charakterystyczną dominantę w sylwecie miasta. Budowa wysokościowca rozpoczęła się w 2001 roku i trwała stosunkowo długo, bo aż do 2005 roku, jak na realizację budynku nieprzekraczającego 200 metrów wysokości.

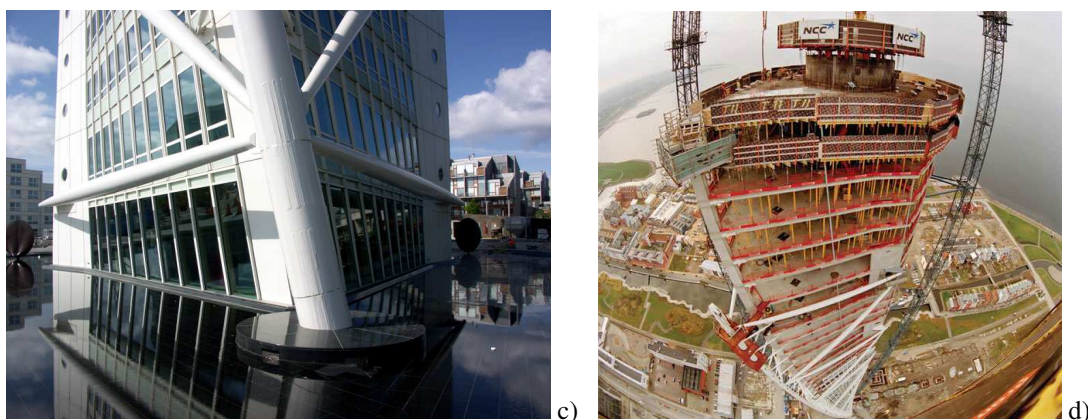
Architektura budynku, poprzez zgeometryzowany kształt konstrukcji z wyeksponowaną na elewacji ramą kratownicową, jest rozpoznawalną ikoną budownictwa wysokiego. Wieżowiec podzielono na dziewięć identycznych segmentów obracających się w planie poziomym względem siebie o 15 stopni, które na szczycie są obrócone o pełne 90 stopni. Podstawowym elementem ustroju nośnego jest walcowy rdzeń żelbetowy posadowiony na płycie fundamentowej o średnicy 30 metrów, usytuowanej na podłożu ze skały wapiennej. Każdy z identycznych dziewięciu segmentów ma stożkową płytę dolną utwierdzoną w rdzeniu budynku i podpierającą 11 stalowych słupów wyższych kondygnacji. Rdzeń, główne słupy i stropy wykonano w technologii żelbetowej. Turning Torso przy wysokości 190 metrów i niewielkiej powierzchni rzutu poziomego jest bardzo smukły. Obiekty o formie zbyt smukłej są podatne na wpływ oddziaływań

poziomych reprezentowanych przez wiatr i mają znaczne wychylenia swoich wierzchołków. W przypadku analizowanego obiektu wychylenie poziome wierzchołka określono jako równe około 30 centymetrów, co jest rezultatem stosunkowo dobrym. Uzyskana wartość wynika w głównej mierze z zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych zewnętrznych ram kratownicowych, będących również swoistą determinantą formy architektonicznej budynku. Wykorzystanie postaci obrotowej fasady wynikało z analiz obciążeń wiatrem budynków o zakrzywionej bryle, co zmniejszyło w sposób znaczący współczynniki aerodynamiczne przy krawędziach elewacji.



Rys. 4.4.14 a i b Budynek Turning Torso w Malmo (Szwecja) (a) widok elewacji budynku (b) zbliżenie na układ skratowań w linii elewacji

Źródło: [i1]



Rys. 4.4.14 c i d Budynek Turning Torso. (c) widok układu stężącego Źródło: [i1], (d) realizacja konstrukcji monolitycznej budynku Turning Torso Źródło: [i41]

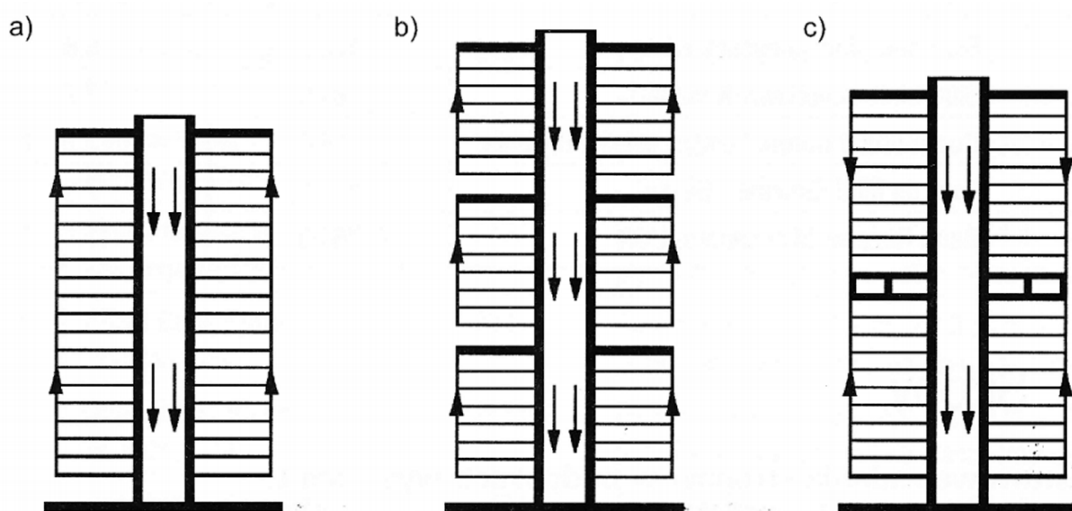
### **Krótkie podsumowanie:**

Typowe postacie systemów trzonowych wraz z zmodyfikowanymi odmianami struktur przestrzennych aplikowane są do budynków niższych, zazwyczaj nieprzekraczających wysokości około 250 metrów. Obiekty z przyjętym systemem trzonowym pozwalają na realizację budynków o interesujących formach architektonicznych. Podstawowym zagadnieniem strukturalnym jest geometria i sztywność elementu konstrukcyjnego, jakim jest sam trzon. Obiekty zaprojektowane w strukturze trzonowej można wznosić przy zastosowaniu zarówno żelbetu, stali lub układów mieszanych i kompozytowych, co jest znaczącą korzyścią.

### **4.5. Analiza wybranej grupy obiektów posiadających wieszarowe systemy nośne**

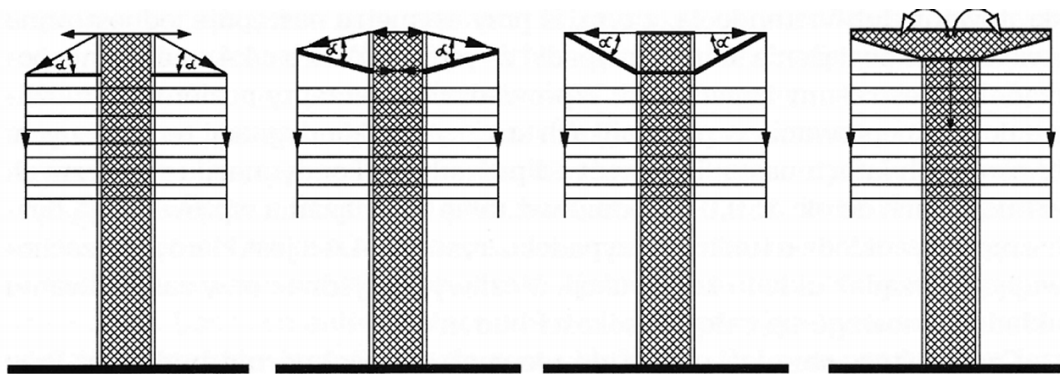
W latach 1950-1975 systemy wieszarowe stosowano stosunkowo często [53,60] uznając, iż jest to jedno z najbardziej efektywnych rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych pozwalających na uwolnienie dolnych kondygnacji budynku od układu podparć nośnych w przyziemiu. Podstawowym założeniem systemów wieszarowych była współpraca masywnego żelbetowego trzonu ze stalowymi wieszakami i/lub elementami wsporczymi. Zaproponowany system konstrukcyjny umożliwiał realizację względnie niewysokich obiektów liczących maksymalnie do 30 kondygnacji [11, 80]. Ograniczenia wysokościowe obiektów o konstrukcji wieszarowej związane były z zagadnieniami technicznymi projektowania wieszaków ze względu na występujące w nich duże siły wewnętrzne oraz znaczne odkształcenia geometryczne związane między innymi z wpływem temperatury. Aby ograniczyć długość przeniesienia sił ze stropów poprzez wieszaki, a następnie ściany trzonu na fundament wprowadzono modyfikację rozwiązania klasycznego (Rys. 4.5.1 a) dzieląc przestrzeń wieżowca na sekcje składające się z kilku kondygnacji (Rys. 4.5.1 b i c). Zaproponowane rozwiązanie pozwoliło skrócić drogę przeniesienia sił wewnętrznych na fundament oraz ograniczyło wpływ zjawiska rozszerzalności termicznej wieszaków. Dodatkowym zagadnieniem, które w omawianym systemie konstrukcyjnym jest skomplikowane, to prawidłowe zaprojektowanie fundamentów.

Trzon żelbetowy jest umiejscowiony zazwyczaj symetrycznie względem rzutu poziomego obiektu i ma stosunkowo niewielką powierzchnię, która musiała w sposób bezpieczny przenieść wszystkie obciążenia występujące w wieżowcu na grunt. Przyjęcie systemu wieszarowego wpływa niewątpliwie również na kształt architektoniczny obiektu, który powinien przyjmować formę symetryczną i możliwie najprostszą. Postać wierzchołka budynku o konstrukcji wieszarowej, jako zakończenia wieżowca, jest zdeterminowana kształtem ustroju nośnego (Rys. 4.5.2). Do ważnych zagadnień technicznych w systemach wieszarowych, jakie na etapie projektu należy uwzględnić, należą zabezpieczenia przeciwpożarowe i antykorozyjne cięgien stosowanych do powieszenia stropów między kondygnacyjnymi. W celu zapewnienia większej sztywności projektanci takich budynków proponowali sprowadzenie cięgien do poziomu fundamentu poprzez kondygnację parteru (Rys. 4.5.3). Wadą zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego związana z pojawieniem się lin w przyziemiu budynku sprawiły, że przedstawione rozwiązanie nie wystąpiło często w tego typu realizacjach.

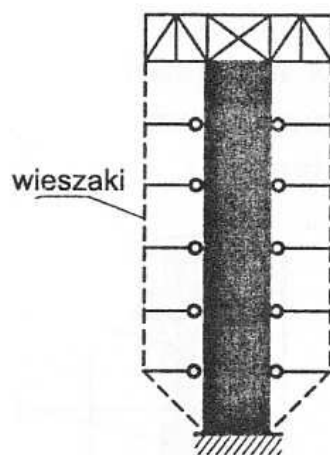


Rys. 4.5.1 a, b, c Schematy obrazujące sposób przenoszenia obciążeń w zależności od przyjętego rozwiązania system wieszarowego

Źródło: [53]



Rys. 4.5.2 Schematy obrazujące sposób kształtowania wierzchołka budynku wysokiego o konstrukcji wieszarowej  
Źródło: [53]



Rys. 4.5.3 Schemat ogólny ustroju wieszarowego ze sprowadzonymi cięgnami do fundamentów  
Źródło: [37]

Wśród najbardziej rozpoznawanych obiektów o typowej postaci ustroju wieszarowego można wymienić budynek First Bank Place w Dublinie o wysokości zaledwie 50 metrów zaprojektowany przez architekta S. Stephensona i zrealizowany w 1978 roku. Kolejnym reprezentatywnym przykładem jest budynek administracyjny w Vancouver w Kanadzie, w którym liny zawieszono bezpośrednio do głowicy trzonu. Konstrukтором obiektu był B. Babicki [53], który poprzez zaprojektowane rozwiązanie konstrukcyjne na wierzchołku wieżowca wyeliminował elementy zginane w szczycie samego trzonu.

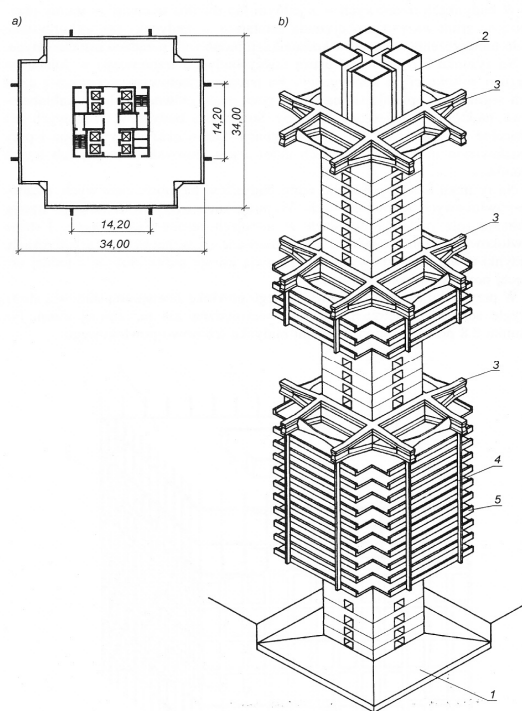
W wyniku ewolucji rozwiązań technicznych klasycznych postaci systemu wieszarowego powstał ustrój wspornikowo-wieszarowy, w którym stropy kondygnacji użytkowych były nie tylko podwieszane poprzez liny do trzonu, ale

również mogły być wsparte na wspornikach utwierdzonych w części centralnej obiektu.

Reprezentatywnym przykładem budynków wieszarowych jest również Communication Tower<sup>18</sup> (Rys. 4.5.4 a) w Johannesburgu w Republice Południowej Afryki. Budynek o wysokości 139 metrów został ukończony w 1968 roku. Główny element nośny budynku, jakim jest trzon żelbetowy, został podzielony na 4 sekcje poprzez zastosowanie trzech poziomach dźwigarów kablobetonowych, na których zawieszono stropy. W każdej sekcji zaprojektowano po osiem dźwigarów z podziałem po dwa elementy nośne przypadające na każdy narożnik budynku (Rys. 4.5.4 b).



Rys. 4.5.4 a Widok budynku Standard Bank Center Źródło: [i13]



Rys. 4.5.4 b Rzut budynku wraz z schematem rysunkowym systemu konstrukcyjnego Źródło: [80]

Skomplikowane obliczenia statyczne wykazały, iż dźwigary kablobetonowe będą musiały mieć wysokość jednej kondygnacji, która została zaprojektowana jako piętro techniczne. Przestrzeń ostatnich czterech kondygnacji przeznaczono na lokalizację urządzeń mechanicznych dźwigów, instalacji klimatyzacyjnych oraz zbiorników wody. Wieszaki służące do mocowania stropów wykonano ze

<sup>18</sup> Inna nazwa budynku to Standard Bank Center

sztynnych kształtowników stalowych [11]. Wyeksponowanie konstrukcji w elewacji, poprzez zabieg cofnięcia okien do wnętrza obiektu, pozwoliło uwypuklić ciekawą strukturalną determinantę formy architektonicznej całego budynku.

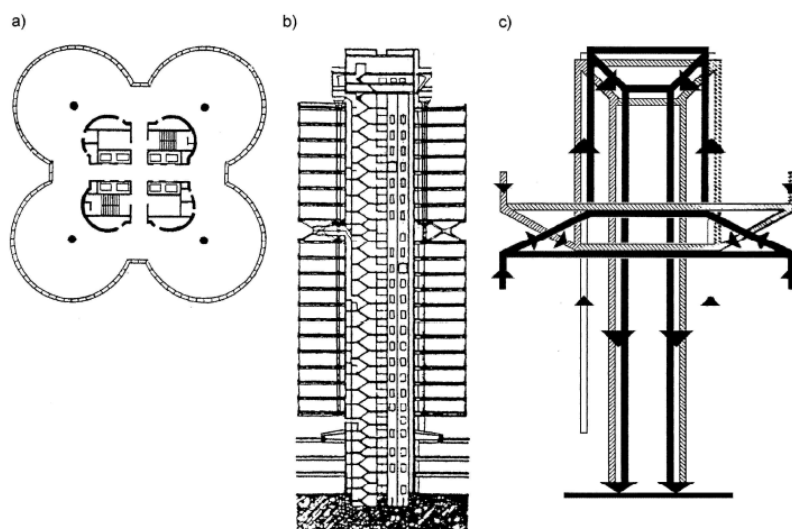
Profesor Zbigniew Pawłowski uznał w swoich publikacjach naukowych, iż najlepszym przykładem konstrukcji wspornikowo-wieszarowej jest budynek administracyjny BMW w Monachium (Rys. 4.5.5), który w sposób najbardziej klarowny i prosty przedstawia system wieszarowy (Rys. 4.5.6).

Wieżowiec o wysokości 101 metrów i liczący 21 kondygnacji nadziemnych został wybudowany w 1972 roku. Kształt rzutu budynku tworzy zespół czterech przenikających się kół wraz z odpowiednim planem centralnie umieszczonego trzonu. Zastosowane rozwiązanie hybrydowe, składające się z podziału budynku na sekcje oraz wprowadzenia elementów wspornikowo-wieszarowych, pozwoliło na uzyskanie ciekawych rozwiązań architektonicznych obiektu. Rezygnacja z elementów nośnych w parterze dała efekt oderwania budynku od ziemi, a efekt zastosowanego rozwiązania ustroju nośnego dodatkowo umożliwił rezygnację ze stosowania masywnych konstrukcji nośnych na samym dachu. Do wysuniętego trzonu ponad poziom górnej kondygnacji obiektu zamontowano ogromne ramiona wsporcze. Osoba oglądająca obiekt, a w szczególności jego wierzchołek odnosi wrażenie, iż budynek można jeszcze nadbudować o kolejne kondygnacje ze względu na wystający trzon.



Rys. 4.5.5 Budynek BMW w Monachium

Źródło: [i1]



Rys. 4.5.6 a, b, c Budynek BMW w Monachium. (a) rzut obiektu (b) przekrój budynku (c) schemat pracy ustroju nośnego wieszarowego

Źródło: [11]

W wyniku dalszych poszukiwań rozwiązań technicznych i korzyści wynikających ze sposobu przekazywania sił w elementach wieszarowych powstały rozwiązania o ustrojach zawieszonych [11]. Przykładem takiego rozwiązania konstrukcyjnego jest budynek dawnego banku Rezerw Federalnych w Minneapolis w USA<sup>19</sup> (Rys. 4.5.7). Obiekt został zaprojektowany przez architekta Gunnara Birkertsą w 1973 roku oraz konstruktora Leslie E. Robertsona. Ustrój nośny (Rys. 4.5.8) składał się z dwóch żelbetowych trzonów o wymiarach 5,5 metra x 18,5 metra, dwóch dwugązgowych łuków stalowych, na których zawieszono stropy oraz przestrzennej kratownicy stalowej o wysokości ponad 8 metrów. Obciążenie ze stropów miało być przekazywane poprzez wieszaki na łuki, które z kolei przekazują siły wewnętrzne na filary. Przestrzenna kratownica ma za zadanie przenosić wszelkie siły poziome i stanowić uzupełnienie systemu sztywności całego budynku. W trzonach żelbetowych, podobnie jak w typowych budynkach wysokościowych umieszczono dźwigi, schody i szachty instalacyjne. Główna komunikacja pomiędzy kondygnacjami odbywa się za pomocą przestrzeni wysuniętej o około 3 metry od wieży, w której znajdują się windy osobowe. Budynek został kilkakrotnie przebudowany od momentu wybudowania, aby w 2011 roku uzyskać certyfikat LEED Platinum przyznany przez US Green Building Council (USGBC). Obiekt nie

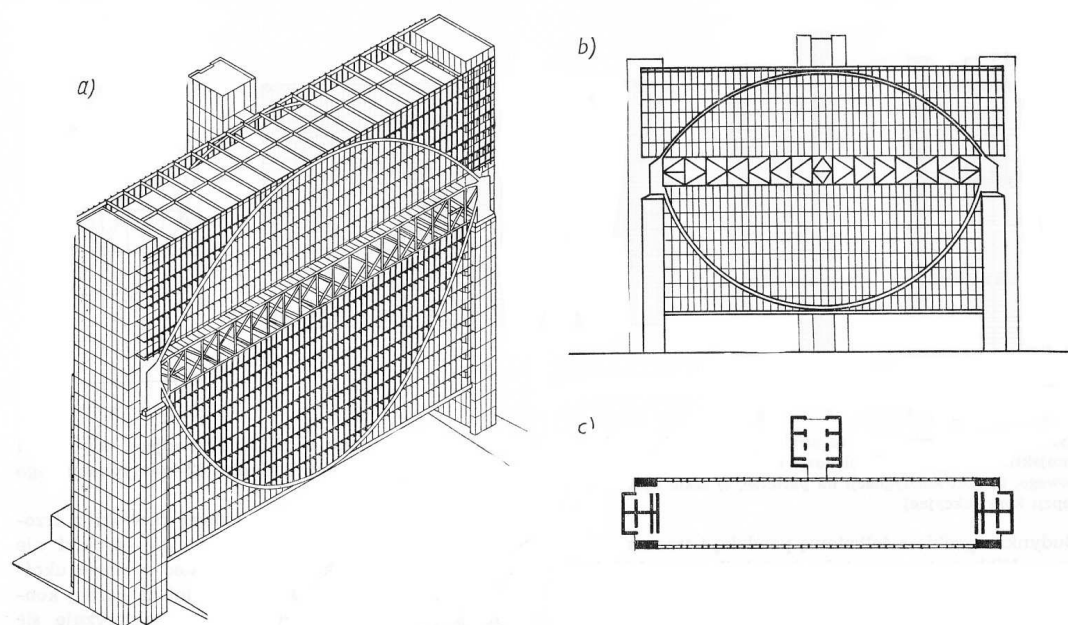
<sup>19</sup> Inna nazwa budynku to Marquette Plaza



należy do grupy budynków wysokościowych w skali światowej<sup>20</sup>, jego wysokość wynosi jedynie 65 metrów, jednakże jego system konstrukcyjny w sposób interesujący przedstawia możliwości kształtowania systemu konstrukcyjnego wieszarowego będących ciekawą determinantą formy architektonicznej.



Rys. 4.5.7 Widok elewacji budynku Marquette Plaza (dawny budynek banku Rezerw Federalnych.)  
Źródło: [i43]



Rys. 4.5.8 Budynek Marquette Plaza. (a) szkic projektu obiektu. (b) widok elewacji. (c) rzut typowej kondygnacji  
Źródło: [11]

<sup>20</sup> Budynki od 25 do 55 metrów zgodnie z Polskimi przepisami [n2] kwalifikują się do obiektów wysokich (W) a powyżej 55 metrów do wysokościowych (WW)

### **Krótkie podsumowanie:**

Budynki o konstrukcji wieszarowej często są klasyfikowane w grupie ustrojów trzonowych ze względu na dominujący element nośny oraz jego funkcję, jaką powinien spełniać zwykle centralnie umieszczony trzon żelbetowy. Musi on przenosić całkowicie wszystkie obciążenia pionowe, poziome, sejsmiczne lub para-sejsmiczne oraz zapewnić stateczność obiektowi. Z szeregu wspólnych cech systemów trzonowych, układy wieszarowe powinny jednakże zostać sklasyfikowane osobno, podobnie jak zostało to uczynione w niniejszej pracy. Schemat pracy układu wieszarowego jest rozwiązaniem znacznie bardziej skomplikowanym i wyróżniającym się na tle innych ustrojów nośnych wieżowców. Zastosowanie układów wieszaków rozciąganych lub zmodyfikowanych wspornikowo-wieszarowych elementów jest przykładem ciekawej ewolucji myśli inżynierskiej. Uwarunkowania technologiczne ograniczają zastosowanie przedmiotowego systemu dla budynku powyżej 150 metrów [53].

#### **4.6. Analiza wybranej grupy obiektów posiadających systemy nośne w postaci powłok ramowych pojedynczych oraz podwójnych określanych jako „trzon w trzonie”**

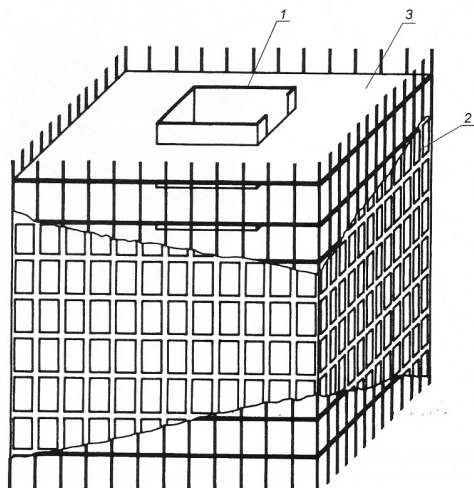
Światowej sławy konstruktor Fazlur Kahn uważał, iż podstawą projektowania budynku wysokościowego jest dążenie do ograniczenia naprężeń w elementach konstrukcyjnych obiektu. Tendencje projektowe w latach 60 i 70 XX wieku związane są nieodłącznie z chęcią wznoszenia coraz wyższych obiektów. Wzrost wysokości budynku wymaga coraz to większej sztywności przestrzennej [32], a obciążenia zewnętrzne działające na obiekt powodują w postępie logarytmicznym wzrost naprężeń wewnętrznych w elementach nośnych. Odpowiedzią na postawione wymagania są ustroje nośne powłokowe z szeregiem ich późniejszych modyfikacji.

Za twórcę systemu powłokowego uznaje się tegoż samego amerykańskiego konstruktora pochodzenia pakistańskiego Fazlura Kahna [32,53]. Idea ustroju nośnego oparta była na założeniu zaprojektowania przestrzennej „pracy” budynku poprzez współpracę żelbetowego trzonu wewnętrznego oraz powłoki zewnętrznej

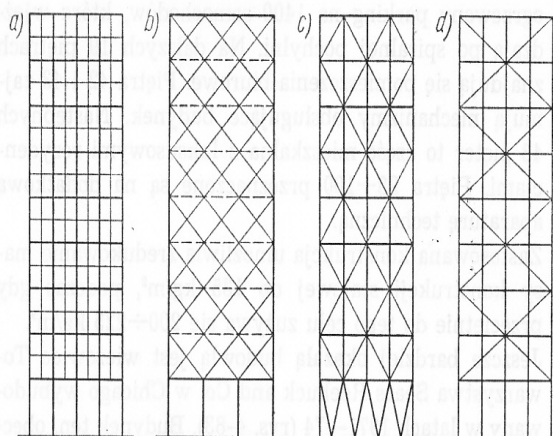
obiektu. Stropy każdej kondygnacji pełnią rolę sztywnej tarczy przenoszącej siły poziome pomiędzy głównymi elementami nośnymi systemu powłokowego. Autor systemu konstrukcyjnego przedstawił go, w następujący sposób: [35] „*to trójwymiarowa konstrukcja przestrzenna składająca się z trzech, czterech albo prawdopodobnie i z większej liczby zwykłych ram, ram ze stężeniami lub ścian połączonych ze sobą w swoich narożach lub w ich pobliżu w coś na kształt pionowego, ruro-podobnego ustroju konstrukcyjnego zdolnego do przeciwstawienia się siłom poziomym działającym z jakiegokolwiek kierunku dzięki swojemu wspornikowemu utwierdzeniu w fundamencie.*” Rozwiązaniami ustroju powłok ramowych pojedynczych lub powłok podwójnych, do których zalicza się również klasyczny system o nazwie „trzon w trzonie”, są powłoki o siatce prostokątnej, diagonalnej lub mieszanej [11, 80, 32]. Kształt powłok (Rys. 4.6.1 a, b, c) związany jest z szeregiem uwarunkowań technicznych i technologicznych. W pierwszej kolejności decydująca jest wysokość obiektu oraz kształt rzutu poziomego wieżowca. W następnej kolejności cechą determinującą pożądany kształt jest rodzaj materiału, z którego zostaną zaprojektowane elementy powłoki, które będą miały funkcję nośną. Systemy powłokowe stosowane są na ogół w obiektach o wysokości między 150 metrów a 300 metrów i posiadających liczbę kondygnacji w granicach 40 - 100 [37, 53]. Na takich wysokościach wartości obciążeń aerodynamicznych działających na budynek wymagają, aby powłoka zewnętrzna budynku przejmowała przeważającą część oddziaływań ze względu na to, iż trzon żelbetowy może być zbyt wiotki. Dodatkowo, odległość samego trzonu od powierzchni elewacji bywa zbyt duża, aby umożliwić efektywną współpracę pomiędzy elementami. Najbardziej efektywnym kątem nachylenia słupów w siatce ustroju powłokowego jest przedział od 45 stopni do 75 stopni<sup>21</sup>.

---

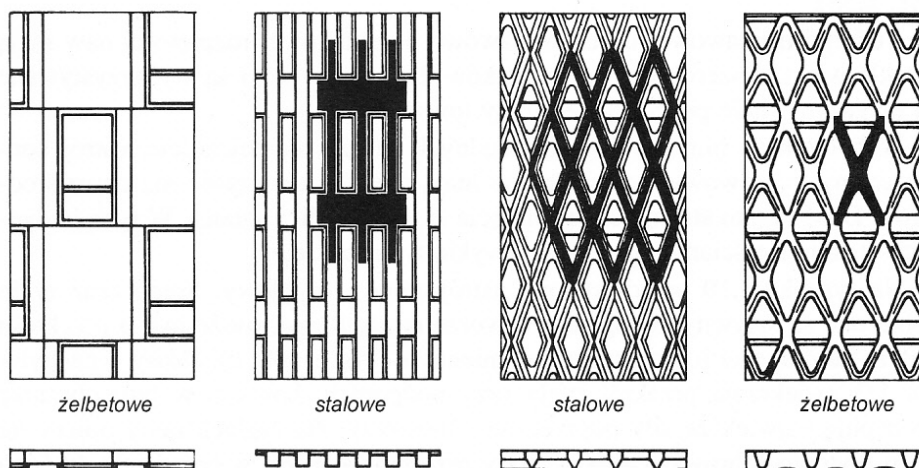
<sup>21</sup> Cała I., Józwick A. Diagonalne systemy konstrukcyjne w budynkach wysokich Materiały Budowlane 12' 2017 (nr 544)



Rys. 4.6.1a Ustrój powłokowy  
1-trzon, 2-powłoka, 3-strop  
Źródło: [80]



Rys. 4.6.1b Schematy siatek geometrycznych  
powłok przestrzennych a) siatka prostokątna,  
b) siatka diagonalna, c) i d) siatka mieszana.  
Źródło: [11]



Rys. 4.6.1c Układ geometryczny elementów powłok  
Źródło: [32,80]

W ustrojach powłokowych wiązki słupów są projektowane w niewielkich odległościach, zwykle jest to rozstaw 1,5 ÷ 2,5 metra, a maksymalnie 3 do 4 metrów. Modyfikacja ustroju powłok ramowych pojedynczych została wymuszona ewolucją form architektonicznych fasad wieżowców. Klasyczny układ powłokowy powoduje uwidocznienie gęstej siatki elementów pionowych na elewacji budynku. Zastosowanie nowych form elewacji wieżowca związane z ograniczeniem elementów strukturalnych widocznych na jego ścianach zewnętrznych przyczyniło się do powstania systemu powłokowego ze skratowaniami. Sztywność przestrzenna wieżowca w takim przypadku zostanie zapewniona poprzez skratowania w postaci

profili stalowych łączonych w węzłach ramy zewnętrznej. W obiektach zrealizowanych w systemie powłok skratowanych forma architektoniczna jest zdeterminowana uwidocznieniem geometrycznych elementów nośnych wykratowań. Rozmiary skratowań są uzależnione od wielkości sił przenoszonych przez samą powłokę. Zasadniczą korzyścią dla funkcji wieżowca w systemach „trzon w trzonie” lub w innych formach powłokowo-ramowych jest uwolnienie przestrzeni wewnętrznej od znacznej liczby słupów. Systemy powłokowe wprowadzone przez Fazlura Khana są stosowane od lat 60 XX wieku do dnia dzisiejszego. Zalety techniczne ustroju oraz silna koherencja konstrukcji i architektury, spowodowana rozwiązaniem detali architektonicznych fasad, przyczyniają się do częstego stosowania opisanych systemów.

Reprezentatywnym przykładem ustrojów konstrukcyjnych powłokowych jest budynek John Hancock Center<sup>22</sup> (Rys. 4.6.2 a) w Chicago. Zaprojektowany został przez pracownię SOM Skidmore, Owings & Merrill oraz Fazlura Khana. Budowę ukończono w 1969 roku, do dnia dzisiejszego budynek wciąż znajduje się w gronie 100 najwyższych obiektów świata, obecnie na 54 pozycji. Zastosowany ustrój nośny budynku oraz forma architektoniczna pozwoliły uplasować obiekt w gronie najbardziej rozpoznawalnych realizacji wieżowców na świecie. Budynek zaprojektowano w kształcie obelisku o wysokości 344 metrów, gdzie znajduje się najwyższy dostępny poziom architektoniczny budynku i wymiarach rzutu poziomego w części górnej 49 metrów x 31 metrów oraz w części dolnej 81 metrów x 50 metrów [11]. Konstrukcja nośna 100-kondygnacyjnego budynku została zaprojektowana w postaci stalowej powłoki zewnętrznej i charakterystycznych skratowań na całej wysokości elewacji wieżowca (Rys. 4.6.2 b). Ciekawym rozwiązaniem technicznym jest szkieletowy trzon wewnętrzny wykonany z gęsto ustawionych stalowych słupów połączonych ze stropami.

Zewnętrzne słupy pionowe w powłoce obwodowej zostały rozstawione co 12,2 metra (Rys. 4.6.3), na których ustawiono belki stalowe wraz z płytą żelbetową o grubości około 13 centymetrów wykonaną na szalunku traconym w postaci blachy trapezowej. Budynek posadowiono na wielkogabarytowych kesonach żelbetowych o średnicy około 2,4 metra. Przyjęte rozwiązanie techniczne dotyczące stalowego

---

<sup>22</sup> Oficjalna nazwa budynku to 875 North Michigan Avenue

trzonu spowodowało, iż nie jest on uwzględniany w procesie wyznaczania sztywności przestrzennej wieżowca, a jedynie przenosi obciążenia pionowe. Przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne dotyczące zastosowania pionowych skratowań w pionowych płaszczyznach elewacji pozwoliło zredukować wielkości drgań o 50% [53], co zostało potwierdzone szczegółową analizą redystrybucji sił wewnętrznych (Rys. 4.6.4). Stalowa konstrukcja (Rys. 4.6.5 a i b) obudowy została wyłożona brązowymi i czarnymi panelami wykonanymi z aluminium oraz ciemnym szkłem fasadowym. Kolorystyka obiektu włącza go do grupy budynków wysokich nazywanych „czarnymi wieżowcami”.



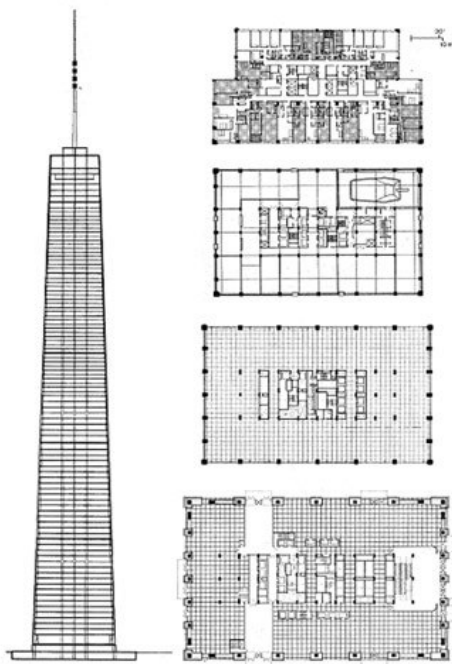
a)



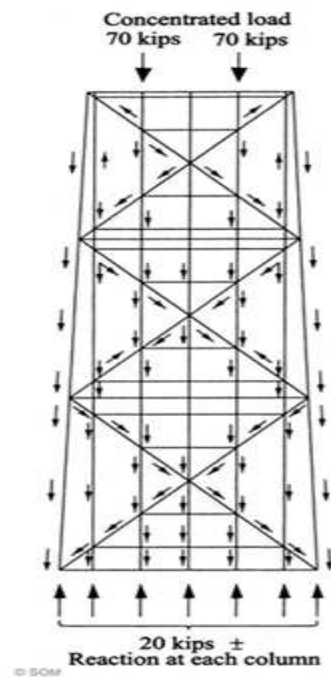
b)

Rys. 4.6.2 a i b Budynek John Hancock Center w Chicago

Źródło: [i1]



Rys. 4.6.3 Przekrój pionowy oraz charakterystyczne rzuty budynku  
Źródło: [i14]



Rys. 4.6.4 Schemat obrazujący redystrybucję sił w powłoce budynku JHC  
Źródło: [i14]



a)



b)

Rys. 4.6.5 a i b Stalowa konstrukcja budynku JHC w Chicago  
Źródło: [i14]

Kolejnym interesującym przykładem współczesnego wieżowca wybudowanego w systemie powłokowym, choć znacznie zmodyfikowanym

względem klasycznego rozwiązania zaproponowanego przez Fazlura Khana, jest 30 St Mary Axe<sup>23</sup> (Rys. 4.6.6 a i b). Wieżowiec jest reprezentatywnym przykładem aplikacji ustrojów powłokowych zaprojektowanych w Europie w konstrukcji stalowej. Budynek o wysokości 180 metrów i posiadający 40 kondygnacjach nadziemnych został zrealizowany w 2004 roku. Projektantem architektury wieżowca jest biuro Foster & Partners, a systemu konstrukcyjnego biuro Ove Arup & Partners. Konstrukcja budynku (Rys. 4.6.7 a, b, c) jest w całości stalowa, zarówno powłoka jak i trzon wewnętrzny, co jest rzadko występującym rozwiązaniem technicznym w Europie, gdzie dominują ustroje żelbetowe. Powłoka stalowa została zaprojektowana z rur o średnicy do 508 milimetrów i jest połączona ze stropami żelbetowymi za pomocą dźwigarów stalowych. Utrudnieniem technicznym w realizacji poszczególnych kondygnacji było mocowanie stropów do powłoki prętowej pomiędzy węzłami. Ważnym rozwiązaniem technologicznym było zastosowanie stalowego pierścienia w postaci wieńca obwodowego.

Innowacyjnym rozwiązaniem było również utworzenie powłoki o polach skośnie ułożonych, które coraz częściej są chętnie aplikowane w innych projektach współczesnych wieżowców. Ustrój nośny powłokowy, wraz z przyjętą opływową formą architektoniczną, umożliwiają zmniejszenie wartości sił pochodzących od wiatru działających na konstrukcję.



Rys. 4.6.6 a i b Budynek 30 St Mary Axe. widok elewacji budynku (a, b)

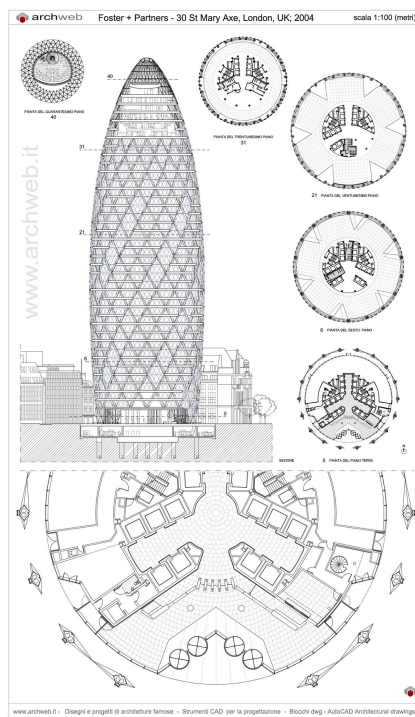
Źródło: [i15]

<sup>23</sup> Inne nazwy budynku to: The Gherkin (ogórek, korniszon) lub Swiss Re Tower



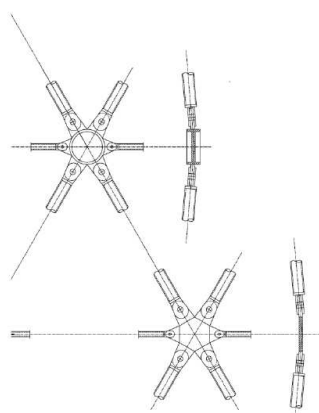


a)



b)

Rys. 4.6.7 a i b Konstrukcja stalowa budynku 30 St Mary Axe  
Źródło: [i15, i2]



Rys. 4.6.7 c Powłoka stalowa Swiss Re wraz z detalem węzła skratowań  
Źródło: [i1]

Obecnie jednym z najbardziej dynamicznych ośrodków geograficznych na świecie, w którym obserwuje się znaczącą liczbę projektowanych i realizowanych budynków wysokich, jest Azja ze szczególnym wyróżnieniem Chin.

Ciekawą realizacją, która pokazuje możliwości systemu powłokowego jest budynek Chińskiej Telewizji Centralnej CCTV w Pekinie (Rys. 4.6.8). Budynek ukończony w 2012 roku został zaprojektowany przez East China Architectural Design oraz biuro Arup, składa się z dwóch pochylonych wież o wysokości 234 metrów i 210 metrów. Łącznik o wysokości 9 kondygnacji pomiędzy wieżami ma wysunięcie o wielkości 75 metrów w kierunku zachodnim i 67 metrów w kierunku południowym. Wymiary rzutu poziomego budynku wynoszą 160 metrów x 60 metrów. Ustrój nośny obiektu oparto na skratowanej powłoce zewnętrznej (Rys. 4.6.9 a i b), która poprzez sztywne węzły tworzy przestrzenną rurę o przekroju prostokątnym. Powłoka zewnętrzna obiektu połączona jest stropami żelbetowymi do słupów i ścian trzonów wykonanych również z żelbetu. Ustrój żelbetowy wież stanowi mocowanie dla stalowego kątownego łącznika wykonanego w konstrukcji wyłącznie stalowej. W tym przypadku struktura powłoki została zaprojektowana w ortogonalnym układzie połączeń słupów, belek obwodowych oraz wykratowień widocznych na elewacjach budynku. Zagęszczone powierzchnie skratowań są logicznym rozwiązaniem technicznym w miejscach, gdzie występują maksymalne naprężenia wewnętrzne w elementach nośnych. Intrygująca forma architektoniczna budynku związana z ogromnymi przewieszzeniami powoduje stosowne konsekwencje w sposobie kształtowania systemu fundamentowania tego obiektu. Konieczne było zaprojektowanie płyty fundamentowej pod wyższą wieżą o grubości 7,6 metra, a pod niższą o grubości 4,5 metra [53]. Wraz z fundamentem płytowym wykonano ponad 370 pali o średnicy około 1,2 metra i długości 52 metrów.



Rys. 4.6.8 a i b Budynek CCTV w Pekinie (Chiny)  
Źródło: [i1]



c)



d)

Rys. 4.6.8 c i d Budynek CCTV w Pekinie (Chiny)  
Źródło: [i1]



a)



b)

Rys. 4.6.9 a i b Konstrukcja nośna budynku CCTV w Pekinie (Chiny)  
Źródło: [i16]

Ustroje powłokowe można zastosować w wieżowcach znacznie wyższych niż w przedstawionych powyżej trzech przykładach takich obiektów. Budynek Guangzhou International Finance Center<sup>24</sup> (Rys. 4.6.10 a i b) ukończony w 2010 roku w Guangzhou w Chinach o wysokości 439 metrów został zaprojektowany z zastosowaniem powłoki zewnętrznej skratowanej (Rys. 4.6.11 a i b), która współpracuje z żelbetowym trzonem wewnętrznym. Cechą charakterystyczną wieżowca o 103 kondygnacjach nadziemnych i 4 podziemnych jest stalowo-żelbetowa powłoka kratowa rozmieszczona wzdłuż obwodu obiektu. Ciekawa forma architektoniczna jest związana z podwójnie zakrzywioną elewacją oraz rezygnacją z trzonu żelbetowego na wysokości, gdzie następuje zmiana funkcji użytkowo-społecznej wieżowca, co stanowi spektakularny przykład definiujący strukturalną spójność systemów powłokowych. Budynki projektowane w tej strefie klimatycznej muszą spełniać warunki stateczności w trakcie występowania bardzo silnych wiatrów, jakimi są tajfuny, których prędkość może przekraczać ponad 150 km/h. Projektanci z biura Wilkinson Eyre oraz Arup zastosowali w przedmiotowym wieżowcu kompozytowy ustrój nośny stalowo-żelbetowy, który jak pokazała analiza w punkcie nr 3.6 jest rozwiązaniem coraz częściej stosowanym dla budynków o wysokości powyżej 300 metrów tj. wg. klasyfikacji CTBUH superwysokich. Rezygnacja z trzonu żelbetowego od 70-ej kondygnacji do samego wierzchołka stanowi dowód na wysoką nośność skratowanych powłok stalowych (Rys. 4.6.12). Średnica głównych rur stalowych tworzących powłokę wynosiła 1800 milimetrów przy grubości ścianki wynoszącej 50 milimetrów [40] (Rys. 4.6.13 a i b). Ściany żelbetowe centralnego trzonu na poziomie kondygnacji podziemnych miały grubość 120 centymetrów. Wraz z wysokością zmniejszały się sukcesywnie do grubości 50 centymetrów w miejscu gdzie zaczyna się wysokie atrium hotelowe.

---

<sup>24</sup> Inna nazwa budynku to: West Tower.



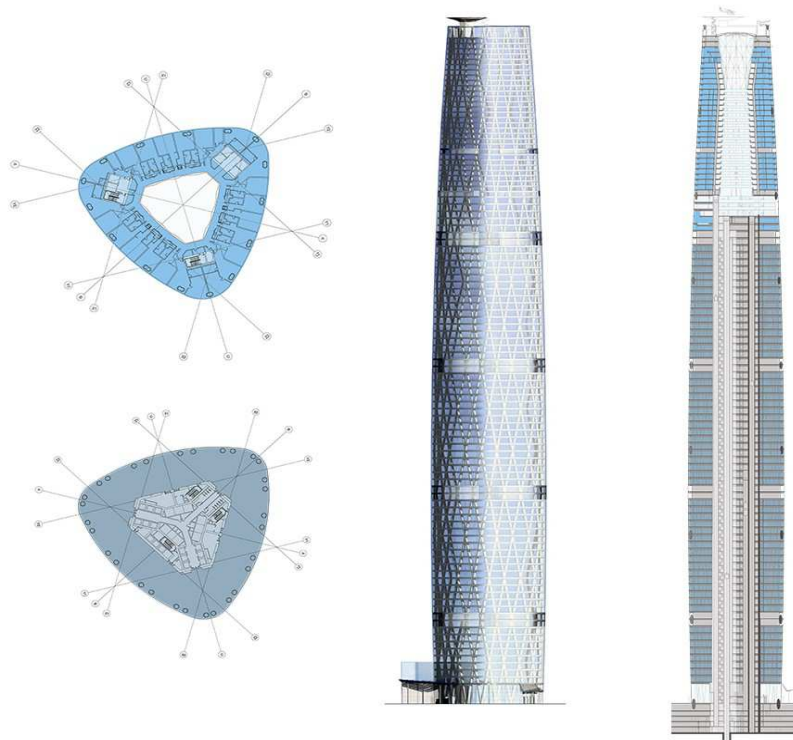
Rys. 4.6.10 a i b Budynek Guangzhou International Finance Center  
 Źródło: [i1, i15]



Rys. 4.6.11 a Stalowa powłoka kratowa  
 Źródło: [i1]



Rys. 4.6.11 b Słupy powłoki zewnętrznej na parterze  
 Źródło: [i15]



Rys. 4.6.12 Rzut, elewacja oraz przekrój pionowy przez budynek Guangzhou International Finance Center  
 Źródło: [i17]



Rys. 4.6.13 a Stalowy słup powłoki  
 Źródło: [40]



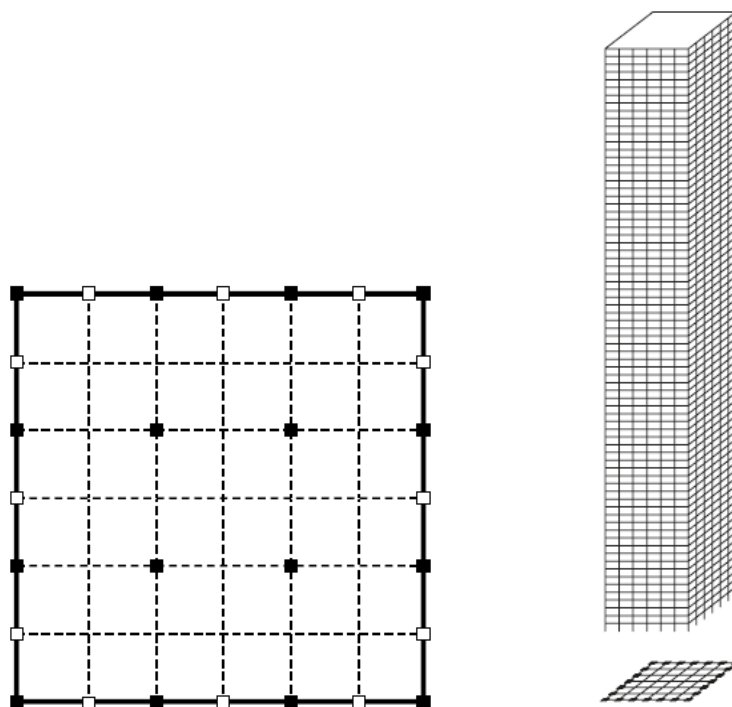
Rys. 4.6.13 b Widok słupów skratowania budynku  
 Źródło: [40]

## **Krótkie Podsumowanie:**

Stalowe konstrukcje powłok pozwalają na znaczne oszczędności w ilości materiału zużytego do budowy wieżowca na poziomie 33% [11] w porównaniu do konstrukcji klasycznych form układów szkieletowych. Ustroje powłokowe wraz z ich modyfikacjami są ciekawym i efektywnym rozwiązaniem technicznym dla budynków wysokich. Systemy powłokowe są stosowane w szczególności w USA i Azji [60]. Możliwości techniczne pozwalają na swobodę kształtowania różnych form architektonicznych, co jest niewątpliwą zaletą tego rozwiązania. Mankamentem ustrojów powłokowych, dla niektórych odbiorów architektury budynku, może być ich silny wpływ na walory estetyczne. Decyzje architektów o wykorzystaniu strukturalnych determinant projektowanych wieżowcach wskazują, iż taka koherencja obu dyscyplin może dać w ostatecznym wyniku bardzo ciekawy i unikatowy kształt przestrzenny budynku.

### **4.7. Analiza wybranej grupy obiektów zaprojektowanych jako megastruktury**

Interesującymi systemami konstrukcyjnymi budynków wysokościowych, które w sposób spektakularny przedstawiają ewolucję form układów nośnych są megastruktury. Za twórcę ustroju nośnego uznaje się Fazlura Khana [53]. System konstrukcyjny wieżowca w postaci megastruktury (Rys. 4.7.1) tworzy zespół powłok modularnych połączonych ze sobą w sposób sztywny. Autor systemu określił go, jako „sztywną rurę” oraz „prawdziwy wspornik” [49]. Wynika to w szczególności z całkowitej rezygnacji z zastosowania elementu konstrukcyjnego jakim jest żelbetowy trzon. Poszczególne powłoki modularne są wykonane w konstrukcji stalowej o bardzo zagęszczonym rozstawie słupów pionowych. Niewątpliwą wadą ustroju są wielkości geometryczne elementów konstrukcyjnych tworzących cały ustrój. Wiązki powłok modularnych będące podstawowym elementem systemu megastruktur ograniczają możliwość zastosowania wewnętrznego trzonu o postaci znanej z ustrojów trzonowych czy megakolumn. Cechą charakterystyczną megastruktur jest ich silnie zaakcentowana geometryczna forma przestrzenna wieżowca.



Rys. 4.7.1 Postać systemu megastruktury na podstawie rzutu poziomego  
Źródło: [49, 76, 87]

W publikacjach naukowych niektórzy autorzy zaliczają megastruktury do ustrojów powłokowych w związku z występowaniem wiązek powłok modularnych. Jednakże zaproponowane przez Fazlura Khana rozwiązania technologiczne w tym systemie konstrukcyjnym wymagają odrębnej klasyfikacji, co zostało przedstawione na diagramie graficznym w rozdziale nr 4.2 (Rys. 4.2.6).

Modelowym przykładem przedstawiającym system megastruktur jest budynek Sears Tower<sup>25</sup> (Rys. 4.7.2 a, b, c) w Chicago. Projektantami wieżowca o wysokości 442 metrów, licząc do linii dachu, oraz 527 metrów licząc do wierzchołka dwóch anten zamontowanych na szczycie budynku, byli Bruce Graham i Fazlur Khan z firmy Skidmore, Owings and Merrill (SOM). Obiekt po trzech latach budowy ukończono w 1974 roku. Ogólnodostępne informacje dotyczące kosztów budowy informują, iż realizacja obiektu kosztowała 150 milionów dolarów. Obiekt ten podobnie jak John Hancock Center w Chicago należy do grupy wysokościowców określanych mianem "czarnych wieżowców". Wynikało to głównie z kolorystyki elewacji obiektu, której barwa była praktycznym

<sup>25</sup> Inna nazwa budynku to Willis Tower



rozwiązaniem problemów estetycznych w okresie występowania znacznych zanieczyszczeń powietrza.



a)



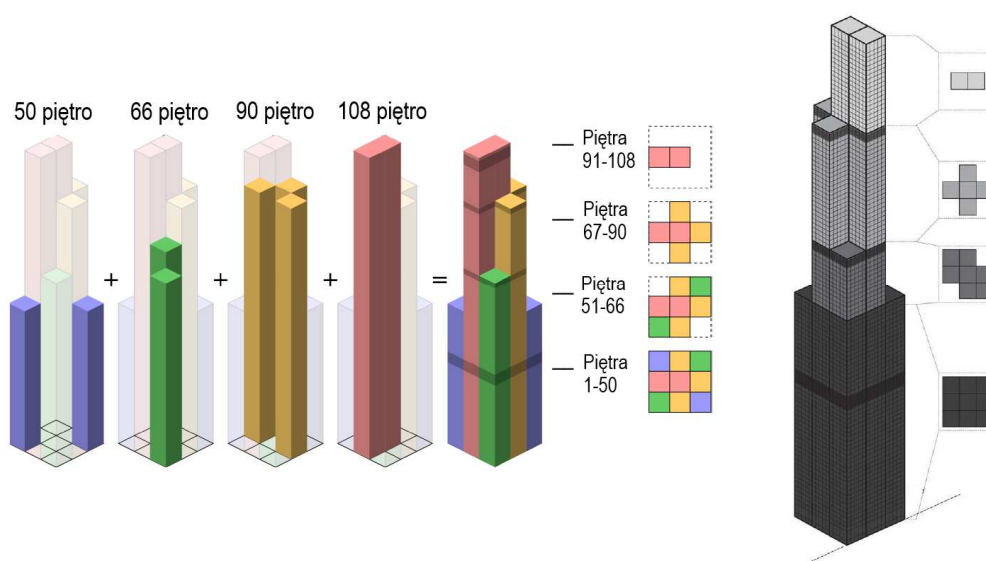
b)



c)

Rys. 4.7.2 a, b, c Budynek Sears Tower w Chicago (a, b) wieżowiec na tle panoramy Chicago  
Źródło: [i22]

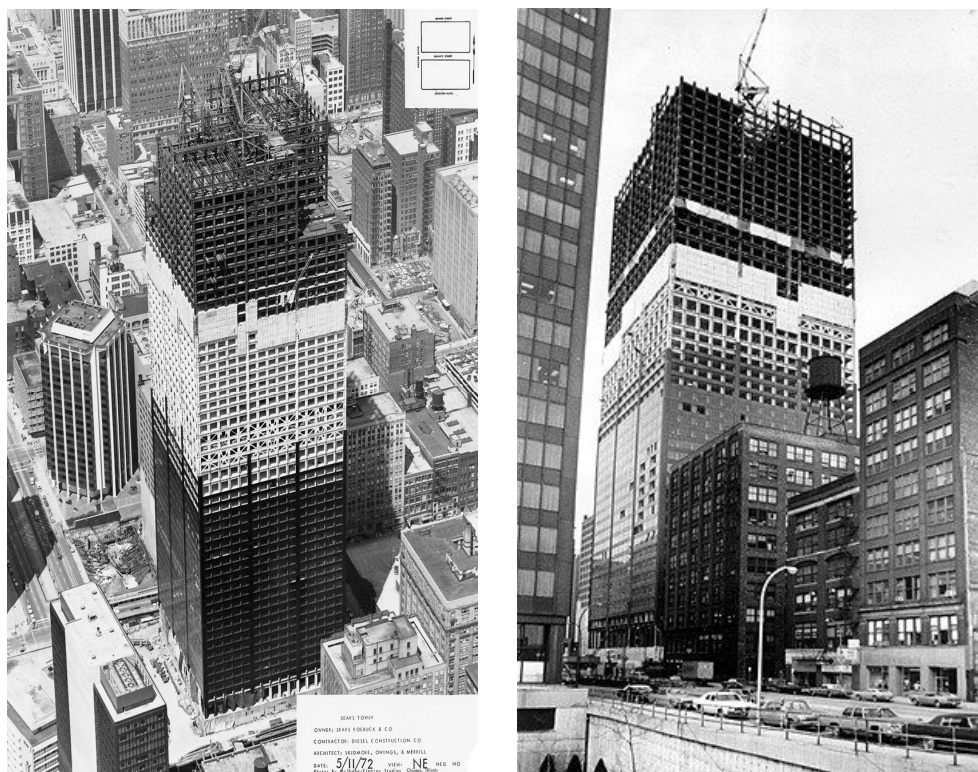
Sears Tower jest obiektem o unikatowym systemie konstrukcyjnym stosowanym dla budynków superwysokich, czyli liczących ponad 300 metrów (wg. klasyfikacji CTBUH). Kształt rzutu poziomego budynku na różnej wysokości w sposób modelowy ilustruje zasadę podziału modularnego takiej konstrukcji (Rys. 4.7.3). Każdy ze skonstruowanych 9 modułów ma wymiary poziome około 22,5 metra x 22,5 metra. Wraz ze wzrostem wysokości budynku zmniejsza się liczba modułów, aby na wysokości 108-ej kondygnacji pozostały już tylko dwa. Forma architektoniczna wieżowca dzięki zastosowanemu rozwiązaniu konstrukcyjnemu, pozwoliła umiejscowić budynek wśród budynków określanych mianem „ikon architektury” lub „ikon budownictwa”. Od momentu ukończenia budynku w 1974 roku budynek wciąż znajduje się wśród 20 najwyższych wieżowców świata oraz jest najwyższym budynkiem wykonanym w całości w konstrukcji stalowej.



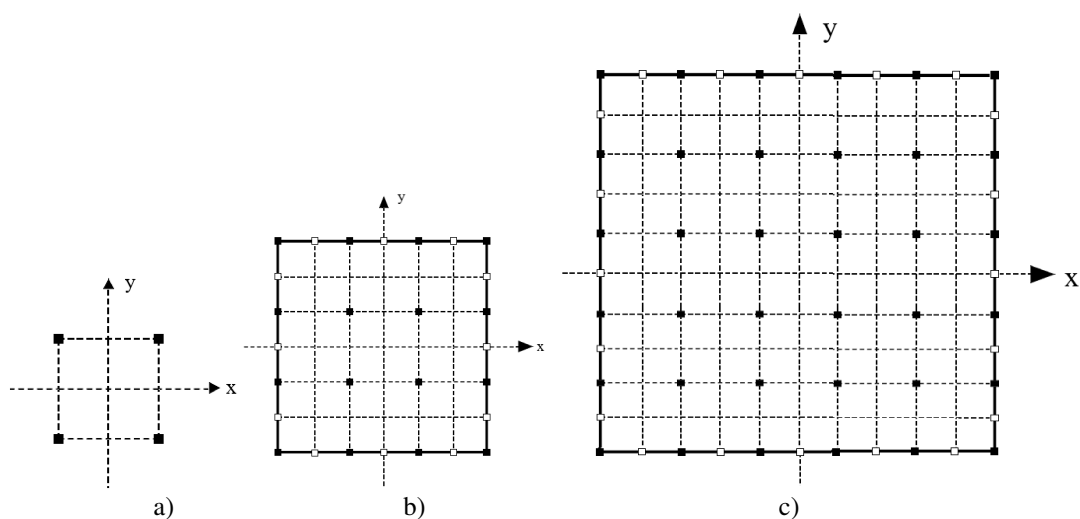
Rys. 4.7.3 Zasada podziału modularnego konstrukcji Sears Tower  
Źródło: [i18, i22]

Konstrukcja stalowa wieżowca (Rys. 4.7.4 a i b) składa się ze spawanego szkieletu o siatce ortogonalnej. Słupy poszczególnych modułów są rozmieszczone w rozstawie co około 4,5 metra, a rygle o wysokości 102 centymetrów biegną w poziomie stropów między kondygnacyjnych. Połączone konstrukcyjnie moduły „wiązki rur” pozwalają uzyskać równomierny rozkład naprężeń w elementach nośnych obiektu, a w szczególności uzyskać równomierne rozłożenie sił przy płycie fundamentowej, którą wspomaga zespół 114 kesonów opartych na skale znajdującej

się na głębokości 30 metrów [11]. Podstawowym założeniem systemu megastruktur było dążenie do przyjęcia takiej formy „wiązek rur”, aby główne słupy konstrukcyjne nie leżały wzdłuż osi obojętnych rzutu poziomego budynku. Preferowanym rozwiązaniem było zaprojektowanie modułu składającego się z jednej, trzech lub pięciu „wiązek rur” (Rys. 4.7.5).



Rys. 4.7.4 a i b Konstrukcja stalowa budynku Sears Tower w trakcie realizacji  
Źródło: [119]



Rys. 4.7.5 Schematy rysunkowe układu „wiązek rur” stosowanych w systemie megastruktur  
(a) schemat wiązki jednopolowej, (b) schemat wiązki trójpolowej, (c) schemat wiązki pięciopolowej  
Źródło: [opracowanie własne]

Realizacja budynku składającego się ze schematu wiązek pięciopółowych (Rys. 4.7.5 c), ze względów technicznych oraz z uwagi na ograniczoną możliwość oświetlenia wnętrza światłem naturalnym, prawdopodobnie nie będzie mieć miejsca w praktyce projektowej.

### **Krótkie podsumowanie:**

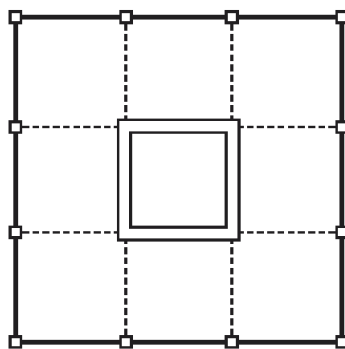
Systemy megastruktur można spotkać w innych wysokich obiektach takich, jak Allied Bank Plaza lub Rialto Tower. Wadą ustroju nośnego jest wielkość elementów konstrukcyjnych oraz wynikowa mocno zgeometryzowana forma architektoniczna, która nie zachęca do częstego stosowania tego systemu konstrukcyjnego. Obecne tendencje projektowe, związane z tworzeniem form opływowych, skręconych lub zakrzywionych wieżowców, nie pozwalają na racjonalne zastosowanie wiązek modularnych. Niewątpliwie ustrój megastruktury zaproponowany przez Fazlura Khana można aplikować do wieżowców super wysokich ze względu na korzystne właściwości statyczno-konstrukcyjne.

### **4.8. Analiza wybranej grupy obiektów zaprojektowanych w systemie megakolumn**

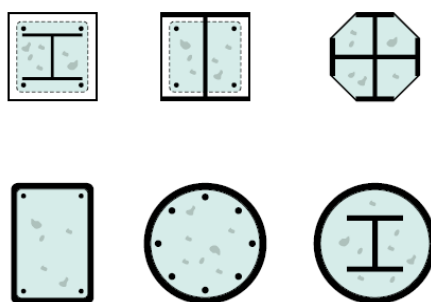
Projektowanie budynków coraz wyższych sięgających wysokości ponad 400-500 metrów przyczyniło się do poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, które pozwoliłyby realizować najwyższe obecnie wieżowce na świecie przy swobodnym kształtowaniu formy architektonicznej obiektu. Systemy powłokowe wraz ze swoimi modyfikacjami w sposób znaczący odznaczając się na estetyce elewacji budynku poprzez mocne zaakcentowanie swojej obecności manifestowane przez gęsty układ prętów pionowych lub skośnych. W związku z dążeniem do zredukowania wpływu systemu konstrukcyjnego na wygląd elewacji obiektu zaproponowano całkowicie nowy system konstrukcyjny. Za autorów systemu megakolumn uznaje się inżynierów z biura Thornton Tomasetti Engineers.

Podstawowe założenia klasycznego systemu megakolumn (Rys. 4.8.1) opierają się na ścisłej współpracy wolnostojących kolumn kompozytowych, składających się ze słupów żelbetowych, o dużych wymiarach geometrycznych,

uzupełnionych o kształtowniki stalowe w postaci blachownic lub profili walcowanych (Rys. 4.8.2) oraz masywnego żelbetowego trzonu znajdującego się w części centralnej wieżowca.

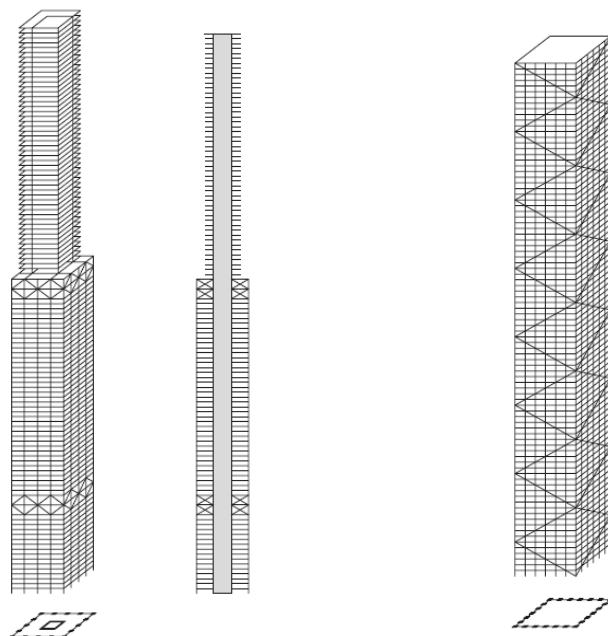


Rys. 4.8.1 Postać systemu megakolumn na rzucie poziomym budynku  
Źródło: [49,76,87]



Rys. 4.8.2 Schematy rozwiązań słupów kompozytowych w systemie megakolumn  
Źródło: [76, 87]

Na podstawie wniosków z przeprowadzonych analiz własnych okazało się, iż wymiary geometryczne megakolumn wynoszą od 100 centymetrów x 300 centymetrów do 150 centymetrów x 500 centymetrów. W celu uzyskania pożądanej sztywności przestrzennej obiektu kolumny kompozytowe łączone są z żelbetowym trzonem poprzez kratownice stalowe. Połączenia stosowane są na kilku poziomach (Rys. 4.8.3) w zależności od wysokości budynku oraz wymaganej sztywności przestrzennej.



Rys. 4.8.3 Klasyczny system megakolumn z trzonem centralnie umieszczonym  
Źródło: [76]

Rys. 4.8.4 Zmodyfikowany system megakolumn z skratowaniem  
Źródło: [76]

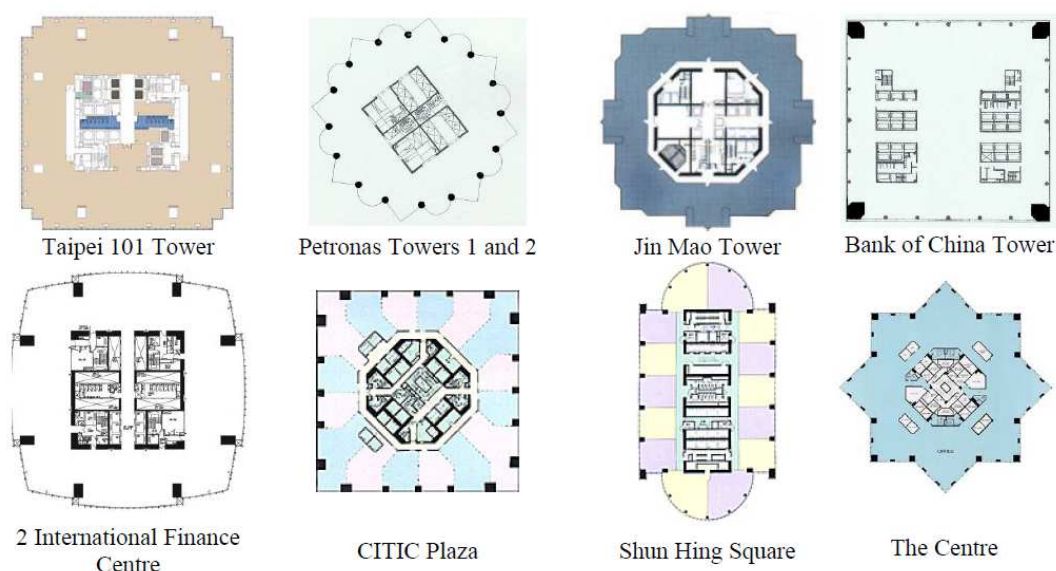
Współczesne realizacje wieżowców oparte na typowym systemie megakolumn zakładają występowanie słupów żelbetowych w linii elewacji budynku lub nieco cofniętych do wnętrza (Rys. 4.8.5). Założenia konstrukcyjne dotyczące lokalizacji megakolumn wymagają stosowania ich w układach symetrycznych oraz znacznej powtarzalności kształtu rzutu poziomego budynku [53].

System megakolumn często jest proponowany dla budynków najwyższych określanych jako „mega wysokie wieżowce”<sup>26</sup> przekraczających wysokość 600 metrów. Powstanie oraz ewolucja tego rodzaju systemu była możliwa poprzez stosowanie betonów o wysokiej wytrzymałości oraz możliwości podawania mieszanki betonowej na znaczne wysokości wynoszące nawet 500-600 metrów bez znaczącej utraty jej parametrów chemicznych.

Modyfikacją klasycznego rozwiązania konstrukcyjnego było wprowadzenie skratowań (Rys. 4.8.4) w liniach elewacji wieżowca, które mogą być zaakcentowane na fasadzie obiektu. Rozwiązanie konstrukcyjne podyktowane było zamiarem zmniejszenia lub redukcji wielkości trzonu wewnętrznego, co w konsekwencji powodowało zmniejszenie sztywności całego budynku.

<sup>26</sup> Zgodnie z definicją CTBUH

Wprowadzenie układu krzyżulców oraz kratownic obwodowych, łączących megakolumny, pozwoliło zwiększyć wymaganą zdolność do przyjmowania dużych obciążeń działających na wieżowiec. Podstawowym założeniem zachęcającym do stosowania systemu megakolumn ze skratowaniem są zalety płynące ze współpracy zmodyfikowanych systemów powłokowych oraz słupów wielkogabarytowych.



Rys. 4.8.5 Przykłady rzutów budynków wysokich w systemie megakolumn  
Źródło: [27]

Jednym z najbardziej rozpoznawalnych współczesnych obiektów wysokich wykonanych w systemie megakolumn jest Shanghai World Financial Center w Shanghaju, w Chinach. Wieżowiec zaprojektowany przez biuro KPF (Kohn, Pedersen, Fox) został ukończony w 2008 roku. W pierwotnej wersji projektu miał on mieć wysokość 460 metrów i zawierać 94 kondygnacje. W ostateczności SWFC posiada wysokość 492 metrów i 101 kondygnacji. Wysokość obiektu została podwyższona już po wykonaniu fundamentów, co wymagało przeprojektowania konstrukcji budynku poprzez obniżenie jej ciężaru przy zachowaniu pożądanej sztywności dla obiektów wysokościowych. Charakterystycznym elementem, który wyróżnia obiekt, jest jego szczyt z otworem przypominającym odwrócony trapez, który pierwotnie miał być w kształcie koła. Budynek SWFC (Rys. 4.8.6 a i b) jest reprezentatywnym przykładem aplikacji systemu megakolumn, które współpracują z masywnym trzonem stalowo-żelbetowym. Zaprojektowany trzon wykonano w postaci kompozytowej ze względu na zmienny poziomy kształt przekroju obiektu na

całej wysokości, (Rys. 4.8.7). Wraz z wysokością obiektu zmniejszają się również wymiary centralnie ulokowanego samego trzonu (Rys. 4.8.8 a i b).

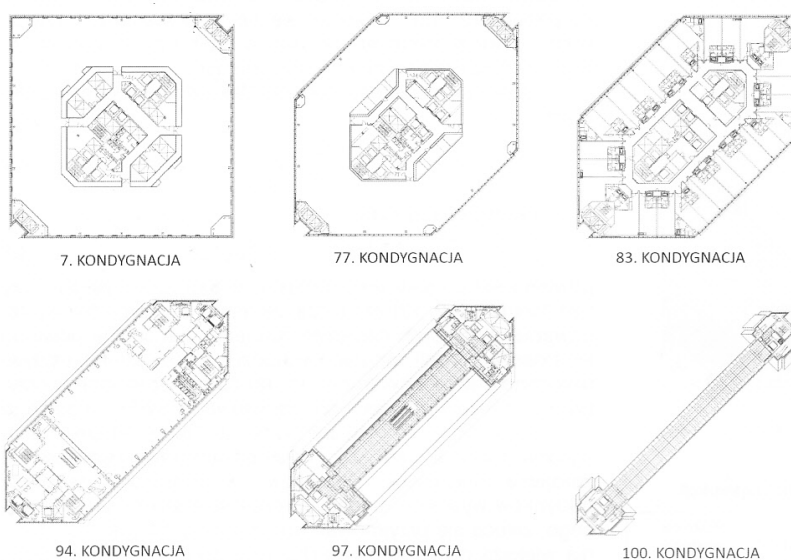


a)

b)

Rys. 4.8.6 a i b Budynek Shanghai World Financial Center

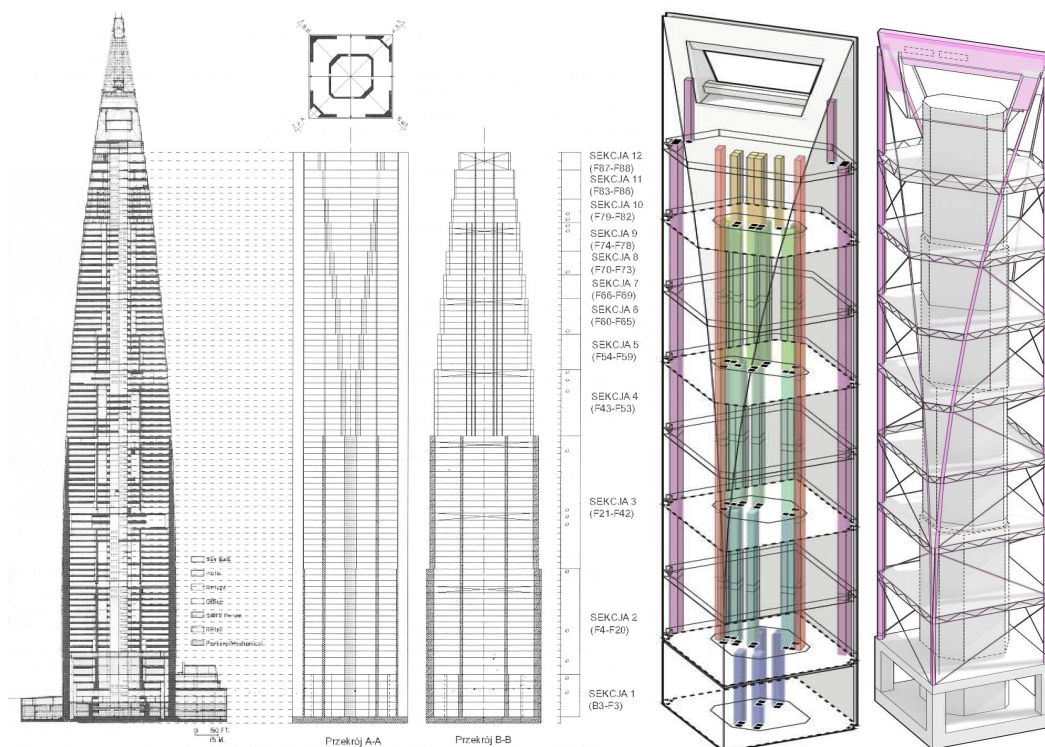
Źródło: [i1]



Rys. 4.8.7 Rzuty typowych kondygnacji budynku SWFC

Źródło: [26]



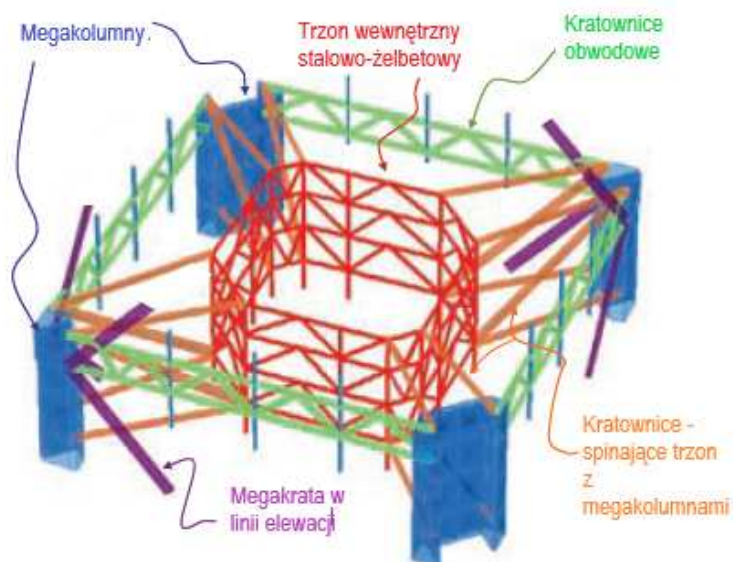


Rys. 4.8.8a Przekroje pionowe wyjaśniające wewnętrzny trzon budynku  
Źródło: [26]

Rys. 4.8.8b Wizualizacja układu geometrycznego pionów komunikacyjnych budynku SWFC  
Źródło: [26]

Ustawienie megakolumn w narożach obiektu, których największy wymiar geometryczny wynosi ponad 5,5 metra, w połączeniu z zastosowaniem tzw. *outriggerów*, pozwoliło uzyskać większą sztywność przestrzenną pomimo wprowadzonych ograniczeń dotyczących zmniejszenia ciężaru samych elementów nośnych. Kratowe elementy nośne tworzące *outringery* wykonano ze stali o przekroju zamkniętym skrzynkowym i są wypełnione betonem. Dodatkowym rozwiązaniem, jakie wprowadzili projektanci po decyzji o zwiększeniu wysokości, było doprojektowanie dodatkowych kratownic opaskowych (Rys. 4.8.9), łączących potężne megakolumny ze sobą. Na całej wysokości budynku wprowadzono siedem poziomów kratownic opaskowych. Ostatnim ważnym elementem strukturalnym wpływającym na przyjętą formę architektoniczną budynku są kilkunastokondygnacyjne skratowania (Rys. 4.8.10 a i b), znajdujące się na pionowych powierzchniach elewacji. Wszystkie elementy stalowo-żelbetowe tworzą zamknięty układ przestrzenny, któremu można przypisać pewne cechy wcześniej omówionego systemu „megastruktury”. Cały ustrój nośny SWFC oparto na

fundamencie zespolonym [26] składającym się z płyty fundamentowej oraz 2271 pali, z których najdłuższe są umiejscowione pod samym trzonem i mają długość 80 metrów.



Rys. 4.8.9 Schemat elementów konstrukcyjnych budynku SWFC  
Źródło: [26]



Rys. 4.8.10 Skratowania w linii elewacji budynku SWFC  
Źródło: [i21]

Jednym z najwyższych budynków wzniesionym w systemie megakolumn jest Ping An Finance Center (Rys. 4.8.11 a i b) w Shenzhen w Chinach. Wieżowiec o wysokości 599 metrów ma 115 kondygnacji nadziemnych oraz 4 podziemne, został zaprojektowany przez biuro architektoniczne KPF oraz pracownię konstrukcyjną Thornton Tomasetti. Budynek ukończony w 2017 roku uzyskał certyfikat LEED na poziomie GOLD. Projektanci konstrukcji obiektu, w celu zmniejszenia wymiarów geometrycznych oraz tym samym ciężaru megakolumn i ścian trzonu, zastosowali rozwiązania materiałowe kompozytowe (Rys. 4.8.12) dla wszystkich elementów nośnych. Zwarta bryła obiektu wraz z układem ośmiu megakolumn kompozytowych (Rys. 4.8.13) łączonych kratownicami opaskowymi na sześciu poziomach pozwalają zapewnić równomierne naprężenia pod fundamentem oraz zapewnić odpowiednią sztywność i stosowaną odporność na dynamiczne kołysania górnych kondygnacji.



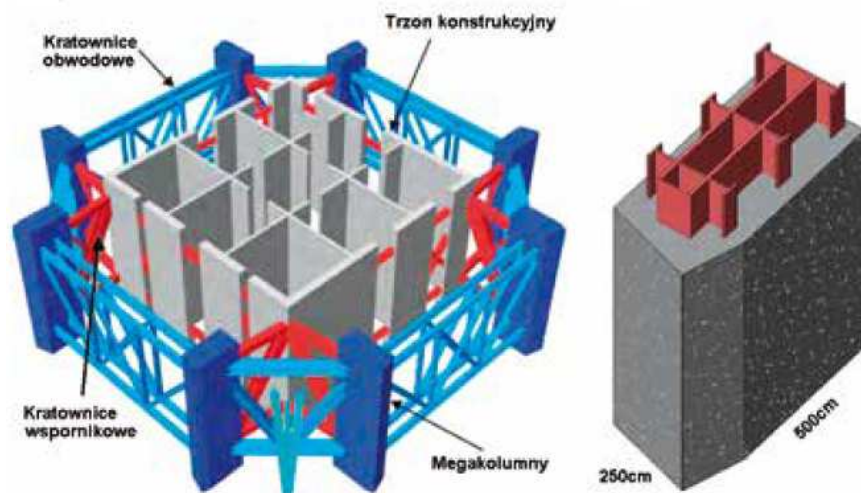
a)



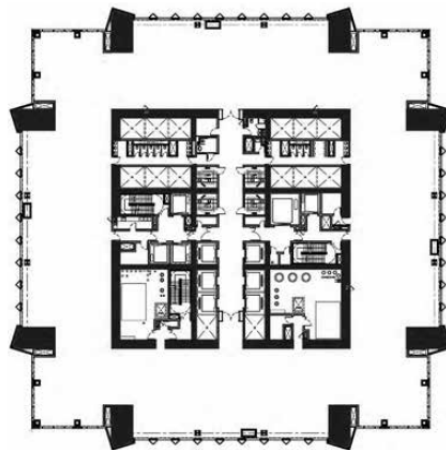
b)

Rys. 4.8.11 a i b Budynek Ping An Finance Center w Shenzhen

Źródło: [i1]



Rys. 4.8.12 Schemat graficzny układu konstrukcyjnego budynku oraz  
Kształtu megakolumny kompozytowej  
Źródło: [52]



Rys. 4.8.13 Rzut kondygnacji budynku przedstawiający rozmieszczenie megakolumn  
Źródło: [52]

Kratownice opaskowe na trzech poziomach mają wysokość dwóch kondygnacji, na pozostałych poziomach są rozwiązaniami jedno kondygnacyjnymi. Ośmiem megakolumn rozmieszczonych regularnie na rzucie jest połączonych dodatkowo z trzonem poprzez wspornikowe kratownice wewnętrzne. W płaszczyźnie elewacji zastosowano, podobnie jak w przypadku SWFC, kilkunastokondygnacyjne skratowania (Rys. 4.8.14 a i b).



a) b)  
 Rys. 4.8.14 a i b Konstrukcja budynku Ping An Finance Center  
 Źródło: [116]

Dodatkowym skomplikowanym zagadnieniem, z jakim musieli zmierzyć się projektanci Ping An Finance Center, była niewielka odległość obiektu wynosząca około 5 metrów od tunelu metra. Rozwiązaniem, które zapewniało bezpieczeństwo tunelu metra przed ewentualnymi deformacjami, było zastosowanie płyty fundamentowej o grubości pod samym trzonem wynoszącej 5 metrów, a w pozostałych częściach 3 metry i grubości jednego metra pod samym podium obiektu oraz układ pali i kesonów o znacznych wymiarach geometrycznych. Pod samym trzonem ulokowano gęsto rozstawione kesony o średnicy 5,6 metra, których górny kielich miał wymiar 7,4 metra, a pod megakolumnami zastosowano elementy o średnicy 7,1 metra, podczas gdy kielich w górnej części miał wymiar 9,3 metra. Wszystkie pale i mega pale miały długość od 26 do 31 metrów [52].

Jednym z pierwszych wieżowców wykonanych w systemie megakolumn był Taipei 101 na Tajwanie (Rys. 4.8.15 a i b), który jest zlokalizowany na obszarze o wysokiej aktywności sejsmicznej. Budynek zaprojektowany przez biuro C.Y. Lee & Partners Architects/Planners oraz konstruktorów z pracowni Thornton Tomasetti został ukończony w 2004 roku. Po przeprowadzeniu prac modernizacyjnych

wieżowiec od 2011 roku posiada certyfikat LEED na poziomie Platinum. Liczący 508 metrów wysokości, wliczając w to 60 metrową stalową iglicę, budynek ten posiada 101 kondygnacji nadziemnych oraz 5 pięter podziemnych. Taipei 101 został zaprojektowany na regularnym rzucie poziomym (Rys. 4.8.16) z symetrycznie ustawionymi 8 megakolumnami rozmieszczonymi po jego zewnętrznym obrysie. Na każdy bok elewacji przypadają po dwie megakolumny o wymiarze geometrycznym 3 metry x 4 metry, które zostały zaprojektowane jako kompozytowe. Do wysokości 70-tej kondygnacji zewnętrzny płaszcz megakolumn jest stalowy, a wewnątrz wypełnione betonem, na wyższych piętrach potężne słupy stalowe są już puste. W parterze megakolumny są pochylone do wnętrza budynku ze względu na zaprojektowaną formę architektoniczną. Uskoki na elewacji zostały wykonane co 8 kondygnację, poprzez wysunięcie wspornikowe płyt stropowych. Interesującą formę architektoniczną uzyskano między innymi poprzez zaprojektowane przewężenie budynku na wysokości pomiędzy 30 a 35 kondygnacją (Rys. 4.8.17). Kształt systemu konstrukcyjnego wieżowca jest stały i regularny na całej wysokości. Interesującym rozwiązaniem konstrukcyjnym podyktowanym zmniejszeniem ciężaru obiektu było zaprojektowanie trzonu w postaci 16 słupów kompozytowych. Stosowną sztywność przestrzenną trzonu zapewniają skratowania wzdłuż całej wysokości Taipei 101 oraz tłumik drgań harmonicznym – system TMD. Konstrukcja wieżowca Taipei 101 (Rys. 4.8.18) została posadowiona, podobnie jak przeważająca część budynków wysokich, za pomocą płyty żelbetowej oraz pali o średnicy około 1,5 metra. Wykonanie 382 pali o głębokości 80 metrów zajęło firmie wykonawczej aż 15 miesięcy.

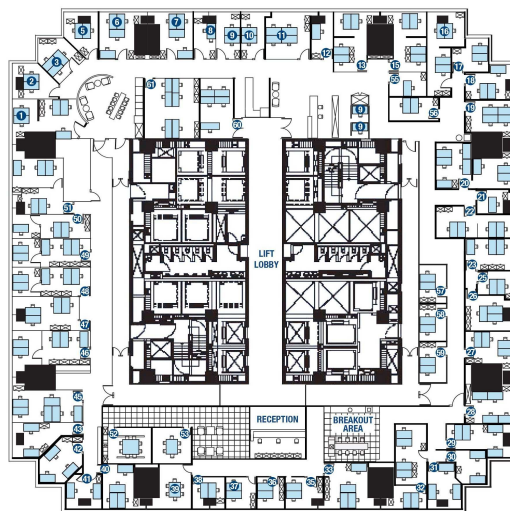


a)

b)

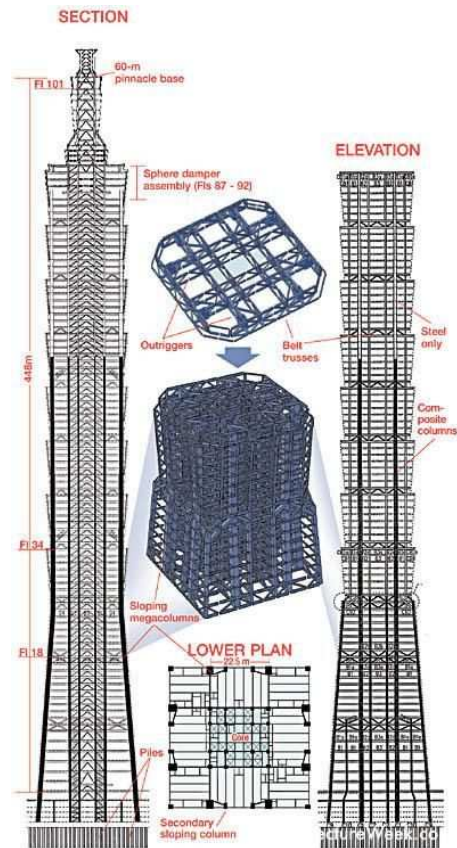
Rys. 4.8.15 a i b Widok budynku Taipei 101 na Tajwanie

Źródło: [i1]



Rys. 4.8.16 Rzut typowej kondygnacji

Źródło: [i22]



Rys. 4.8.17 Przekroje pionowe oraz schematy konstrukcyjne, widoczne zwężenie budynku w połowie jego wysokości  
 Źródło: [i22]



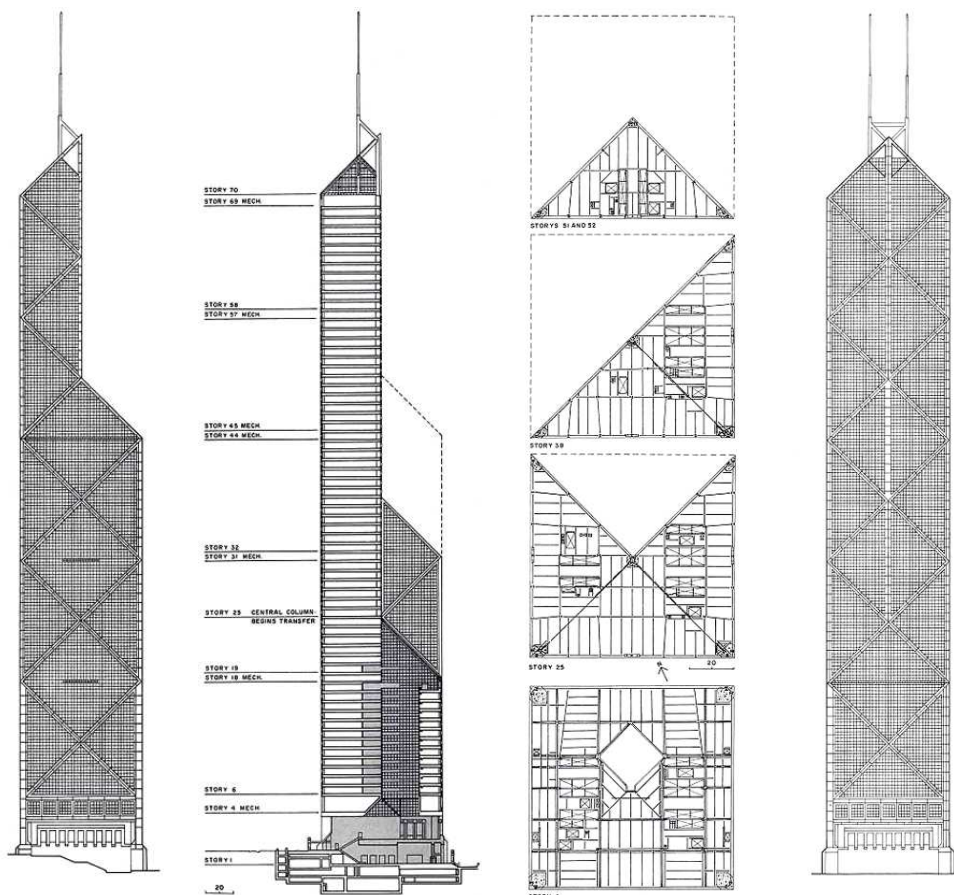
Rys. 4.8.18 Konstrukcja wieżowca Taipei 101  
 Źródło: [i22]



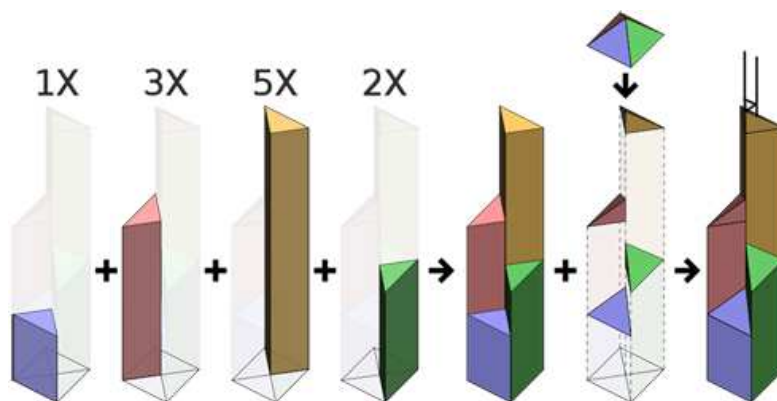
Wieżowcem, w którym system konstrukcyjny megakolumn został zmodyfikowany ze względu na zgeometryzowaną formę architektoniczną jest Bank of China w Hongkongu. Budynek o wysokości 367 metrów został zaprojektowany przez biuro I.M. Pei & Partners oraz Leslie E. Robertson Associates, a jego budowę ukończono w 1990 roku. W wielu publikacjach naukowych opisujących budynek przypisuje się jego ustrój nośny do systemu powłokowego, co uważam za błąd.

Zaprojektowany ustrój nośny w dużej mierze opiera się na megakolumnach umiejscowionych w narożnikach rzutu poziomego budynku (Rys. 4.8.19) oraz jednej megakolumnie znajdującej się w centralnej części rzutu, która nie schodzi do poziomu fundamentów, a także powłoki ramowej, która ma znaczenie w całym ustroju jedynie pomocnicze. Siły wewnętrzne z centralnego słupa są przekazywane na słupy narożnikowe. W wieżowcu Bank of China, poprzez przyjętą formę architektoniczną związaną z zanikaniem fragmentów budynku na wysokości (Rys. 4.8.20) zrezygnowano z zaprojektowania trzonu centralnego. Wykonany trzon usytuowany jest względem jednej z osi rzutu, w najwyższej części budynku trzon ten zmienia swoje położenie [53]. Przyjęte rozwiązanie świadczy o znikomej roli wewnętrznego trzonu dla sztywności przestrzennej tego wieżowca. Rzut poziomy budynku został zaprojektowany poprzez podziały stosownych kwadratów na trójkąty równoboczne. Rezygnacja z klasycznego trzonu spowodowała konieczność zaprojektowania dodatkowego rozwiązania konstrukcyjnego z postaci nośnej powłoki zewnętrznej składającej się z żelbetowych słupów rozmieszczonych wzdłuż linii elewacji oraz wielokondygnacyjnych krzyżulców (Rys. 4.8.21 a i b). Budynek o 70 kondygnacjach nadziemnych oraz 5 kondygnacjach podziemnych poprzez rozwiązania zmodyfikowanego systemu megakolumn dzięki dodaniu nośnej powłoki ramowej musiał zapewnić dostateczną nośność i stateczność w warunkach oddziaływania dużych obciążeń zewnętrznych, jakie są powodowane przez niezwykle silne tajfuny występujące w Hongkongu.

Na elewacji wieżowca zaakcentowano podstawowe elementy nośne, które w połączeniu ze zgeometryzowaną i uskokową formą architektoniczną (Rys. 4.8.22 a i b) pozwoliło na zaprojektowanie ciekawego obiektu wysokościowego.



Rys. 4.8.19 Przekroje pionowe oraz rzuty budynku Bank of China  
Źródło: [i22]



Rys. 4.8.20 Schemat układu uskokowego zgeometryzowanej formy wieżowca  
Źródło: [i22]



Rys. 4.8.21 a i b Budynek Bank of China w trakcie realizacji (lewa fotografia) oraz wygląd ostateczny (prawa fotografia)

Źródło: [i22]



a)

b)

Rys. 4.8.22 a i b Bank of China

Źródło: [i1]

## **Krótkie podsumowanie:**

System konstrukcyjny megakolumn jest często stosowanym rozwiązaniem dla budynków super wysokich, najczęściej powyżej 300-350 metrów wysokości. Możliwości techniczne zapewniające pożądaną sztywność przestrzenną wieżowca leżą u podstaw wyboru przedmiotowego ustroju nośnego dla obiektów od znacznej wysokości. Wpływ układu konstrukcyjnego megakolumn na formę architektoniczną jest nieunikniony, w szczególności jest to widoczne na regularnych kształtach rzutu poziomego wieżowców oraz przeznaczaniu przestrzeni wewnętrznej na wielkogabarytowe słupy. Wybudowane wieżowce, w których zastosowano ustrój kompozytowych megakolumn stały się niekwestionowanymi i rozpoznawanymi symbolami architektury i budownictwa na skalę globalną. Współzależność strukturalnych determinant ustroju nośnego z budowaną za jego pomocą formą architektoniczną jest ścisła, a nawet wręcz pożądana.

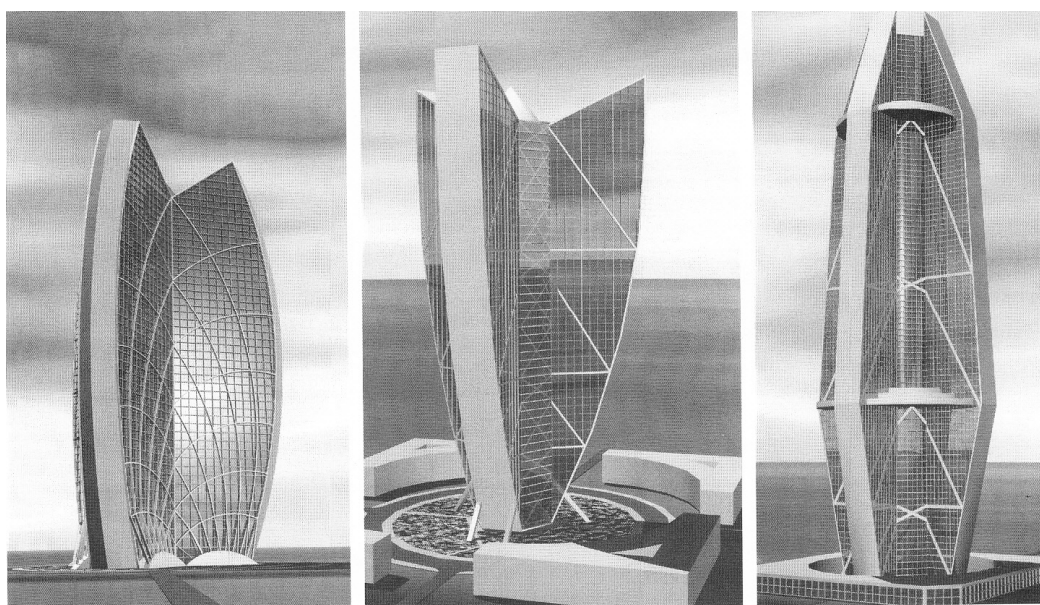
### **4.9. Analiza wybranej grupy obiektów o niekonwencjonalnych lub pionierskich systemach nośnych**

Ewolucja form architektonicznych budynków wysokich oraz rozwój systemów konstrukcyjnych zachodzą w sposób ciągły od około 150 lat. Coraz śmielsze wizje architektoniczne oraz rozwój techniki leżą u podłoża dynamiki zmian zachodzących w procesie projektowym wieżowców. Dostępne w literaturze fachowej informacje techniczne dotyczące systemów konstrukcyjnych oraz licznych ich modyfikacji, polegających na łączeniu kilku klasycznych rozwiązań w poszczególnych ustrojach nośnych, nie powinny określać się jako systemy niekonwencjonalne. Z całą pewnością nie byłoby poprawnie merytorycznie przypisanie im cech pionierskich.

Rozwiązania pionierskie i niekonwencjonalne powinny wносить nowe założenia lub wytyczne techniczne do procesu projektowego budynków wysokich.

Przeprowadzone własne analizy szeregu uwarunkowań projektowych z wielu dyscyplin technicznych wykazały, iż wskazane jest podjęcie tematyki dwóch dotąd niezwyfikowanych pod względem statyczno-wytrzymałościowym koncepcji projektowych. Pierwsza koncepcja oparta na konstrukcjach australijskiego

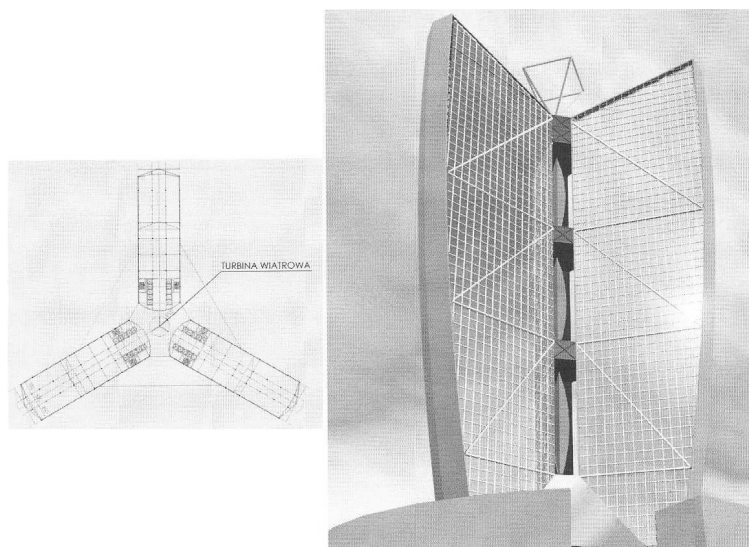
matematyka Michell'a została zaproponowana przez dwóch wybitnych polskich profesorów, Wacława Zalewskiego oraz Wojciecha Zabłockiego. Założenia projektowe oparte na badaniach naukowych Michell'a polegają na znalezieniu optymalnej formy dla konstrukcji budynków wysokich [93]. Zaproponowana konstrukcja wspornikowa kratownicy w kształcie płomienia (Rys. 4.9.1) pozwalała na mniejsze zużycia materiału, lepsze doświetlenie wnętrza oraz większą odporność obiektu na działanie sił poziomych pochodzących od wiatru, dzięki czemu idealnie wpisywałaby się we współczesny nurt projektowy budynków wysokich. Zgodnie z założeniami projektowymi budynków o kształcie „*płomienia lub bulwiastego*”<sup>27</sup> składające się z trzech lub czterech skrzydeł, siły poziome przejmowane są przez konstrukcje funikularne, przyjęte według geometrii zaproponowanej przez A.G.M Michell'a [92, 93].



Rys. 4.9.1 Proponowane formy i kształty wieżowca  
Źródło: [93]

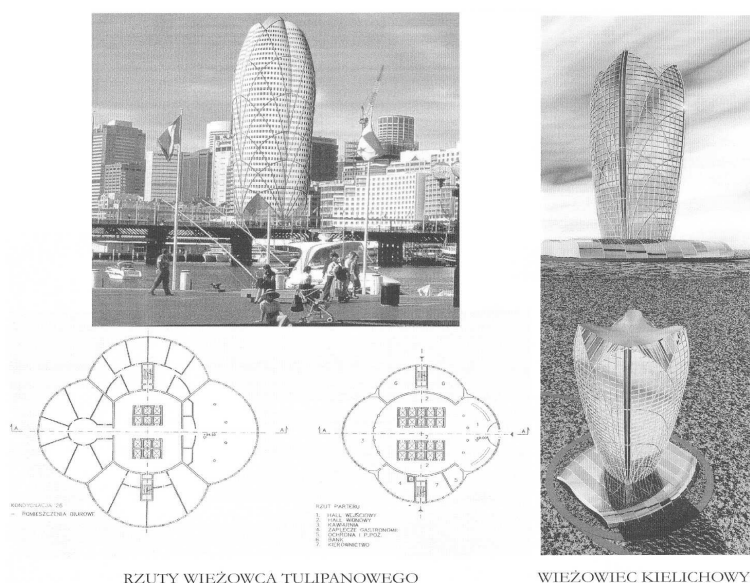
Proponowane rozwiązania (Rys. 4.9.2) dla budynków wysokich wpisują się również w aktualny nurt proekologiczny określany, jako „*eco-tech*” związany z możliwością produkcji energii odnawialnej pochodzącej od oddziaływań wiatru na wieżowiec.

<sup>27</sup> W dostępnej literaturze źródłowej koncepcje Profesora Zalewskiego i Profesora Zabłockiego często są opisywane za pomocą podanych określeń



Rys. 4.9.2 Proponowane rozwiązania proekologiczne związane z turbinami wiatrowymi  
Źródło: [93]

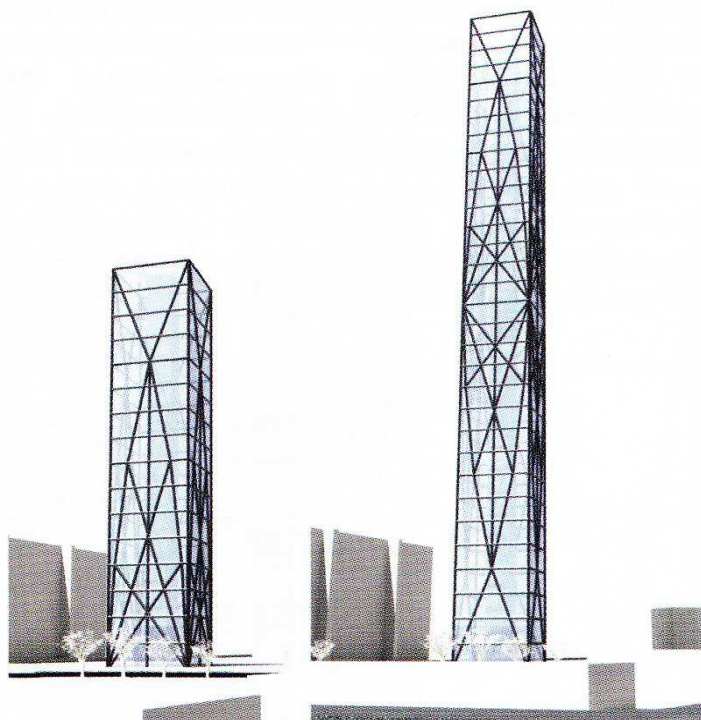
Jednym z bardzo interesujących propozycji rozwiązań pożądanej formy wieżowca są budynki określone, jako „*Tulipanowce lub Kielichowe*”, (Rys. 4.9.3). Ich kształt został utworzony poprzez wielokrotny obrót płaskich rozwiązań zaproponowanych przez Michell'a. Autorska analiza formy zaproponowanego budynku wysokiego wskazuje na zmniejszenie naprężeń w elementach nośnych poprzez wykorzystanie cech aerodynamicznych związanych z jego opływowym kształtem. Wadą rozwiązania, która może zaburzyć ruch wiatru i spowodować niebezpieczne zawirowania, są fragmenty elewacji w kształcie wklęsłym.



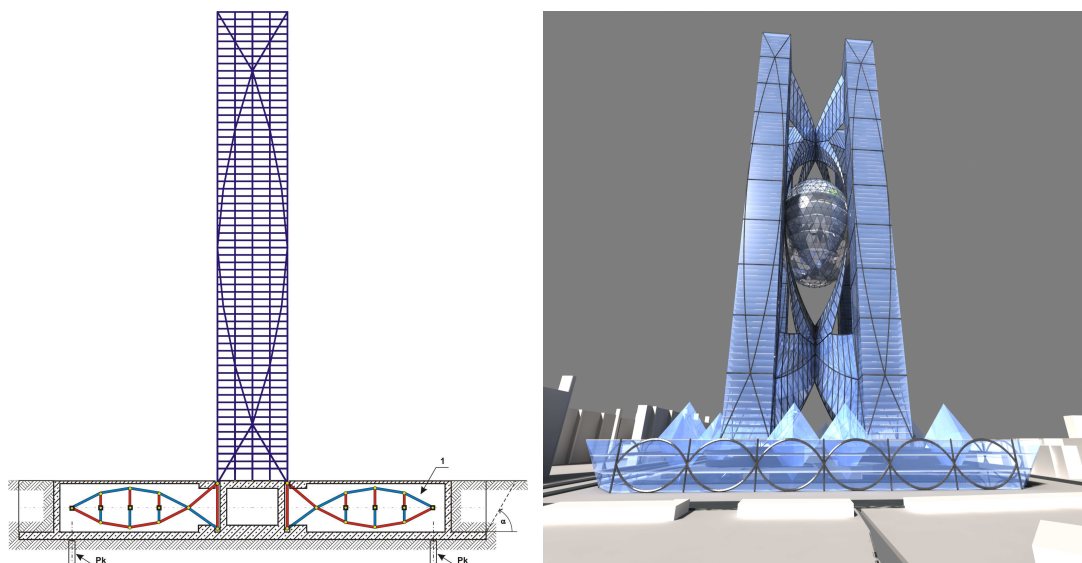
Rys. 4.9.3 Proponowany optymalny kształt budynku Tulipanowego lub Kielichowego  
Źródło: [93]

Reprezentatywnym przykładem rozwiązań pionierskich jest dźwigar soczewkowy (Rys. 4.9.4) w konstrukcji nadziemnej budynku wysokiego zaproponowany przez Profesora Janusza Rębielaka. Zgodnie z założeniami [69] pożądanym ustrojem konstrukcyjnym części nadziemnej jest taki układ nośny, który odznaczać będzie się wysoką sztywnością przestrzenną przy równoczesnej elastyczności pod działaniem sił pochodzących od wiatru lub oddziaływań dynamicznych para-sejsmicznych.

Zaproponowana postać dźwigara soczewkowego [72], która może przyjmować dowolne kształty, składa się z prostych układów które są ułożone równoległe do dwóch przeciwnie skierowanych łuków uzupełnionych pionowymi oraz poziomymi prętami. Wstępne analizy statyczne wskazują na dużą sztywność przestrzenną możliwą do osiągnięcia poprzez przyjętą formę struktury lokowanej w pionowych płaszczyznach elewacji budynku. Zaprojektowane struktury mogą przyjmować postacie czworościanów i ośmiościanów umożliwiając przepływ sił po krawędziach ich zespołów. Rozwiązania strukturalne dźwigara soczewkowego mogą także być eksponowane na elewacjach wieżowca (Rys. 4.9.5) nadając mu cechy indywidualne i ponadczasowe.



Rys. 4.9.4 Proponowane formy architektoniczne oparte na dźwigarze soczewkowym  
Źródło: [69]



Rys. 4.9.5 Proponowane schematy możliwych zastosowań dźwigara soczewkowego  
Źródło: [69]

### **Krótkie posumowanie:**

Przedstawione pionierskie rozwiązania w zakresie projektowania systemów konstrukcyjnych oraz odpowiadających im form architektonicznych zawierają w sobie duże możliwości techniczne stosowania ich dla obiektów super wysokich, których wysokość przekracza 300-350 metrów. Wskazane byłoby przeprowadzenie badań w tunelach aerodynamicznych wspomnianych form i rozwiązań wieżowców, których wyniki pozwoliłyby w doprecyzowaniu rozwiązań technologicznych, a następnie wraz z pełną analizą statyczno-wytrzymałościową z modelu numerycznego wprowadzenie ich do pierwszych realizacji.

## **5. Analiza porównawcza najnowszych obiektów wysokich realizowanych za pomocą różnych rodzajów systemów konstrukcyjnych**

### **5.1. Określenie zakresu analizy oraz rodzajów kryteriów przyjętej oceny**

Współczesne obiekty wysokie, do których można zaliczyć budynki wysokościowe oraz wieże telekomunikacyjne i widokowe, są oprócz mostów i przekryć dachowych o dużej rozpiętości obiektami bardzo złożonymi, których



bezpieczna realizacja jest uwarunkowana szeregiem skomplikowanych wymagań projektowych: architektonicznych, konstrukcyjnych oraz instalacyjnych.

Do grupy obiektów najnowszych umownie przyjęto te realizacje, które zostały ukończone pomiędzy rokiem 1990, a końcem 2018 roku. Przyjęte ramy czasowe są jednym z kryteriów przeprowadzonej analizy porównawczej, a z syntezy wyników pozyskano istotne informacje techniczne związane z obecnie obowiązującymi tendencjami projektowymi. Początkowa data ustalona na rok 1990 wynika z momentu zaobserwowania istotnych zmian zachodzących w projektowaniu obiektów wysokich na świecie związanych między innymi z coraz szerszym zastosowaniem technik komputerowych. W ostatnich trzech dekadach znacząco ewoluowały formy architektoniczne brył obiektów wysokich oraz nastąpił dynamiczny rozwój technologii konstrukcyjnej ustrojów nośnych.

Znaczące zmiany zachodzące w doborze materiału budowlanego konstrukcji nośnej oraz rozwój badań aerodynamicznych w tunelach badawczych stanowią razem podstawę dla przyjętej klasyfikacji czasowej w przeprowadzonej analizie porównawczej. Dobór przedstawionych przykładów obiektów wysokich w niniejszej pracy wynikał ze szczegółowej analizy materiałów źródłowych polsko- i angielskojęzycznych, w których to obiektach w sposób znaczący uwidoczniły się zagadnienia koherencji form architektonicznych oraz systemów konstrukcyjnych.

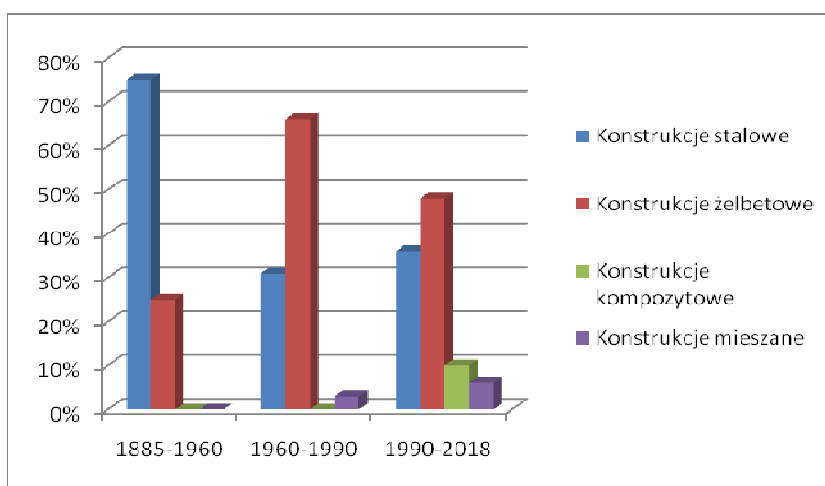
Zaprojektowane i wybudowane obiekty wysokie do końca 2018 roku są budowlami, w których związki i wzajemne relacje obu głównych dyscyplin technicznych są spektakularnie uwidocznione.

W ramach całościowej analizy celowo pominięto realizacje w Polsce, gdyż zakres podjętych wcześniej prac badawczych w innych pracach naukowych jest dość dobrze rozpoznany. Podstawowym celem wykonanej analizy jest uzyskanie z syntezy wyników kluczowych informacji o tendencjach projektowych występujących w skali globalnej. Przeprowadzone badania statystyczne opisujące ośrodek geograficzny „Europa” uwzględnia statystycznie również realizacje obiektów wysokich w Polsce.

## 5.2. Współczesne obiekty wieżowe i wysokościowe

Budowle w rozumieniu stosownych przepisów<sup>28</sup>, w których podstawa rzutu poziomego jest znacznie mniejsza od wysokości, nazywają się "wysokimi lub wieżowymi". Podobnie jak w przypadku budynków wysokich również do tej grupy możemy zaliczyć maszty telewizyjne i radiowe, maszty linii elektroenergetycznych, kominy przemysłowe, pomniki, latarnie morskie, wolno stojące wieże świątyn oraz wieże obserwacyjne [11]. W obiektach wieżowych i wysokościowych podobnie, jak ma to miejsce dla budynków wysokich, dominującymi obciążeniami są siły poziome wywołane parciem lub ssaniem wiatru. Uproszczonym schematem statycznym do obliczeń jest pionowy wspornik utwierdzony w fundamencie. Uwarunkowania projektowe w dużej mierze związane są z rodzajem użytego materiału budowlanego, typem przyjętego ustroju konstrukcyjnego oraz planowanej funkcji obiektu.

Współczesne tendencje projektowe dotyczące zastosowania wybranego rodzaju materiału budowlanego, podobnie jak w przypadku budynków wysokich zmieniają się proporcjonalnie z funkcją czasu (Rys. 5.2.1). Pod koniec XX wieku dominowały konstrukcje stalowe oraz w znacznie mniejszym stopniu ustroje żelbetowe. Współczesne realizacje obiektów wysokościowych, dla których umownie przyjęto okres pomiędzy rokiem 1990 a rokiem 2018 wskazują na zbliżony udział stali oraz żelbetu w konstrukcjach nośnych.



Rys. 5.2.1 Rodzaj materiału budowlanego konstrukcji nośnej obiektów wieżowych w odniesieniu do umownie przyjętych okresów czasu

Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]

<sup>28</sup> Polskie Prawo Budowlane wraz z Rozporządzeniami technicznymi wykonawczymi [n]

W obiektach wysokościowych, szczególnie w wieżach telekomunikacyjnych oraz widokowych, które zostały wykonane ze stali, często stosuje się lekkie przestrzenne układy prętowe tworzące ustrój powłokowy ukształtowany poprzez geometrię trójkątną lub gwieździstą [11]. W ustrojach monolitycznych na ogół obserwujemy systemy nośne o rzucie poziomym kolistym, pierścieniowym lub wielobocznym.

Od 1990 roku na świecie zrealizowano 39 obiektów wieżowych, w których zaprojektowano funkcję teletechniczną wraz z dodatkowymi tarasami obserwacyjnymi i widokowymi udostępnionymi turystom. Największa dynamika wznoszenia obiektów wieżowych, podobnie jak jest w przypadku budynków wysokich ma miejsce w Azji, a w szczególności w Chinach. W ostatnich trzech dekadach zrealizowano tam 17 znanych obiektów wieżowych.

Najbardziej reprezentatywnymi przykładami ilustrującymi swą budową ciekawą koherencję formy architektonicznej oraz systemu konstrukcyjnego są wieże Canton Tower w Chinach oraz Tokyo Skytree w Japonii.

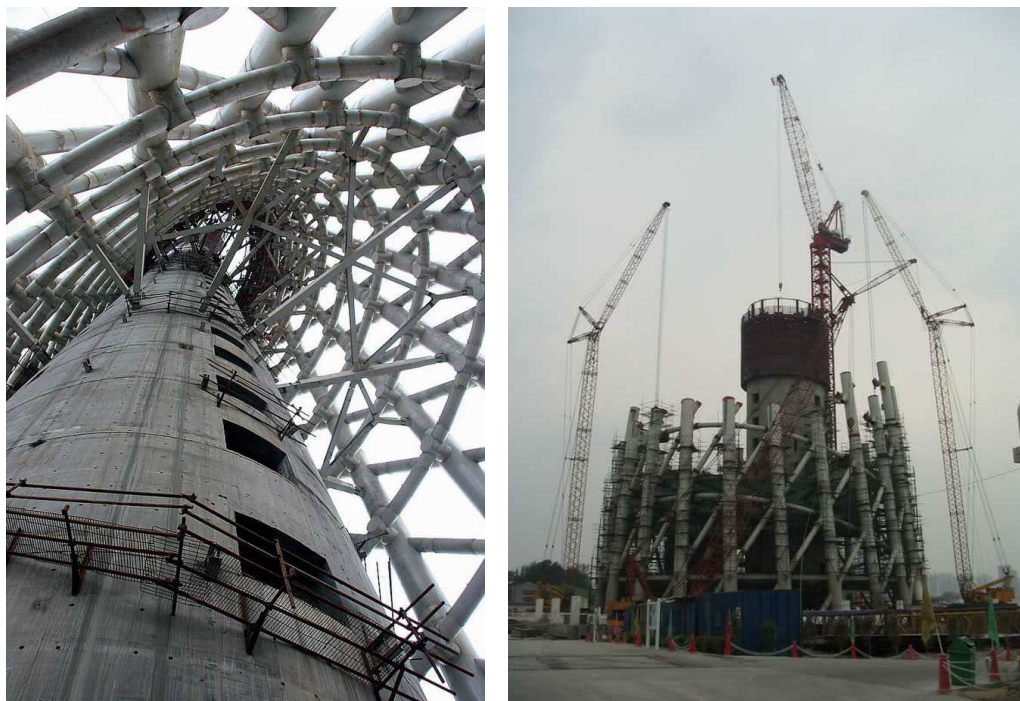
Wieża w Guangzhou o wysokości 604 metrów została zaprojektowana przez biuro Information Based Architecture (IBA) oraz pracownię inżynierską Ove Arup. Canton Tower (Rys. 5.2.2 a i b), wybudowany kosztem 324 milionów dolarów w 2010 roku mieści nadajniki telewizyjne i radiowe, lokale gastronomiczne, sklepy oraz platformy widokowe. W przestrzeni dwóch kondygnacji podziemnych zaprojektowano przestrzeń wystawiennicze, handlowe, parking oraz stację metra.



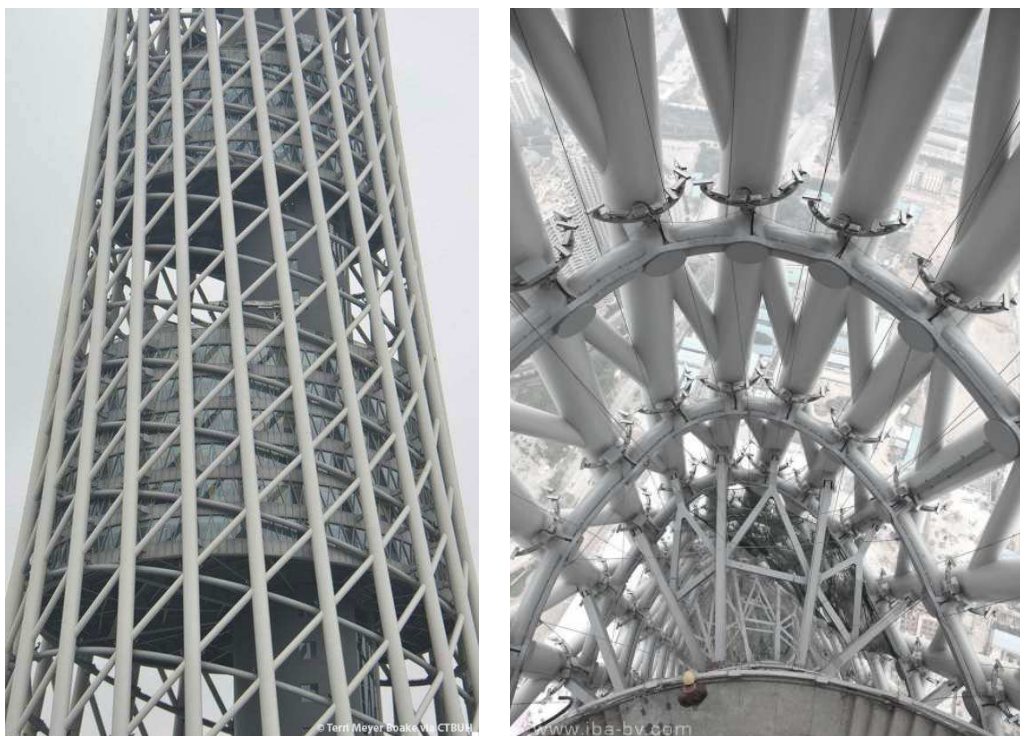
Rys. 5.2.2 a i b Wieża Canton Tower w Chinach

Źródło: [i1]

Konstrukcja wieży składa się z żelbetowego trzonu (Rys. 5.2.3 a i b), zewnętrznej powłoki stalowej (Rys. 5.2.4 a i b) oraz wieńczącego masztu telewizyjnego o wysokości 156 metrów.

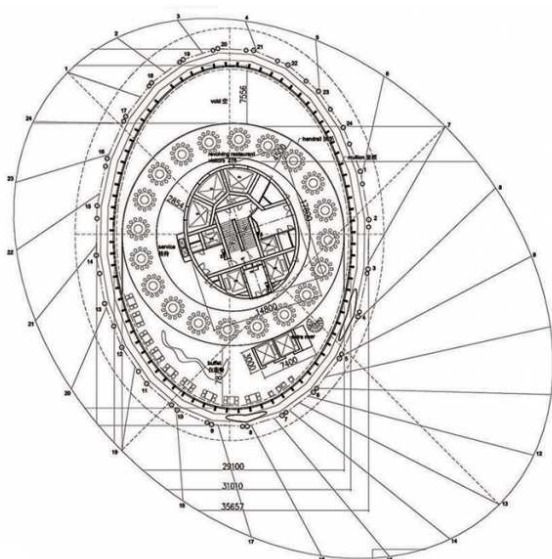


Rys. 5.2.3 a i b Żelbetowy trzon wieży Canton Tower w Chinach  
Źródło: [i24]



Rys. 5.2.4 a i b Stalowa powłoka kratownicowa wieży Canton Tower w Chinach  
Źródło: [i24]

Rzut poziomy wieży Canton Tower ma kształt elipsy (Rys. 5.2.5) o wymiarach 15,6 metra x 18,6 metra. Kształt obiektu powstał poprzez skrócenie prostych słupów tworzących walec o okrągłej podstawie. Uzyskany efekt formy skrócenia wieży Canton Tower spowodował, iż każda kondygnacja ma inny kształt.



Rys. 5.2.5 Rzut poziomy wieży Canton Tower w Chinach  
Źródło: [i25]

Stalowe belki łączące żelbetowy trzon i zewnętrzną kratownicę powłokową stanowią podkonstrukcję żelbetowych stropów kondygnacji użytkowych. W celu uzyskania większej sztywności przestrzennej co około 40 metrów zaprojektowano gęsty układ belek, pełniący funkcję wzmocnienia oraz niwelujący deformację elementów stalowych spowodowanych zmianą temperatury na różnej wysokości. Ustrój powłokowy zewnętrzny jest wykonany w postaci skróconej kratownicy i składa się z 24 słupów oraz z 46 pierścieni. Średnica słupów wynosi około 200 centymetrów na dolnych kondygnacjach oraz około 110 centymetrów na górze wieży. Zaprojektowana skrócona oraz przewężona forma Canton Tower ma nie tylko spełniać założenia architektoniczne, ale również zapewniać efektywne przestrzeganie podstawowych praw statyki i dynamiki konstrukcji. Wszystkie słupy powłoki zewnętrznej są jedynie pochylone, jednakże wszystkie są prętami prostymi. Zaproponowane rozwiązanie pozwoliło ograniczyć wychylenie szczytu wieży do 1,5 metra. Wraz z odpowiednio dobranym systemem konstrukcyjnym zaprojektowano dodatkowo dwa zbiorniki na wodę o pojemności 600 ton każdy, które pełnią

podwójną funkcję, jako magazyn wody do celów przeciwpożarowych, a także jako tłumik drgań spowodowanych siłami wiatru w trakcie często występujących burz tropikalnych oraz czysto hipotetycznie występujących drgań para-sejsmicznych. W trakcie budowy wieży umieszczono ponad 600 czujników mierzących wszelkiego rodzaju drgania, przemieszczenia geometryczne oraz zmiany temperatury poszczególnych elementów nośnych.

Na wysokości 449 metrów, gdzie znajduje się publicznie dostępne obserwatorium, zaprojektowano instalację 16-tu panoramicznych kul, które mogą pomieścić od czterech do sześciu turystów.

Charakterystyczny kształt hiperboloidalny wieży Canton Tower może zachwycić obserwatora swoją harmonią oraz dynamiką. Wykorzystanie walorów ustroju nośnego w postaci strukturalnych determinant formy architektonicznej wieżowca pozwoliło stworzyć obiekt rozpoznawalny na świecie.

Drugim interesującym przykładem przedstawiającym zachodzące zależności formy architektonicznej oraz ustroju nośnego konstrukcyjnego jest wieża Tokyo Sky Tree w Japonii (Rys. 5.2.6 a i b).



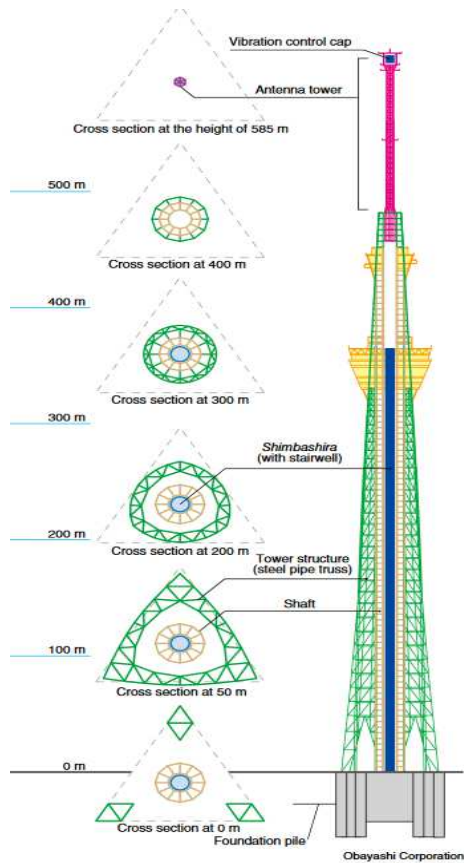
Rys. 5.2.6 a i b Wieża Tokyo Sky Tree w Japonii  
Źródło: [i1]

Obiekt zaprojektowany przez biuro Nikke Sekkei LTD, o wysokości równej 634 metry mierzonej do wierzchołka anteny, jest najwyższą wieżą oraz jednocześnie drugim najwyższym obiektem budowlanym na świecie po wieżowcu Burj Khalifa w Dubaju. Wieża, która została ukończona w 2012 roku posiada dwa tarasy widokowe umieszczone na wysokości 350 metrów i 450 metrów, zawierające także sklepy, restauracje, teatr oraz planetarium.

Konstrukcja nośna składa się z wewnętrznego trzonu żelbetowego oraz zewnętrznej ramy stalowej tworzącej ustrój powłokowy. Obie części ustroju są ze sobą połączone na różnych poziomach celem zwiększenia sztywności przestrzennej oraz minimalizowania wpływu sił powstałych w wyniku drgań sejsmicznych. Ustrój nośny wieży zapewnił wymagany poziom bezpieczeństwa w przypadku trzęsienia ziemi o magnitudzie równej 9 stopni w logarytmicznej skali Richtera.

Tokyo Sky Tree, podobnie jak wiele obiektów w Azji, ma swoje odniesienie do tradycji i kultury lokalnej. Projekt oparto na tradycyjnych rozwiązaniach pagód. Zewnętrzna konstrukcja stalowa została pomalowana w kolorze biało-niebieskim zwanym „aoijiro”. Kształt formy architektonicznej oprócz odniesienia do kultury Japonii uwzględnia uwarunkowania projektowe związane z zjawiskami aerodynamicznymi zachodzącymi wokół wieży [44].

Rzut poziomy wieży wraz ze wzrostem wysokości zmienia swoją formę poziomą, aby na samej górze uzyskać ostateczną postać przypominającą kształt koła (Rys. 5.2.7 a i b). Kolumny stalowe powłoki zewnętrznej wykonano z rur okrągłych o średnicy od 70 centymetrów do 230 centymetrów i grubości ścianki dochodzącej do 10 centymetrów. Krzyżulce oraz belki poziome zaprojektowano również jako zamknięte profile rurowe o maksymalnej średnicy wynoszącej 100 centymetrów i grubości ścianki 6 centymetrów [44]. Cały ustrój nośny posadowiono na platformie żelbetowej wspomaganej znaczną liczbą pali oraz baret (Rys. 5.2.8 a i b).



a)



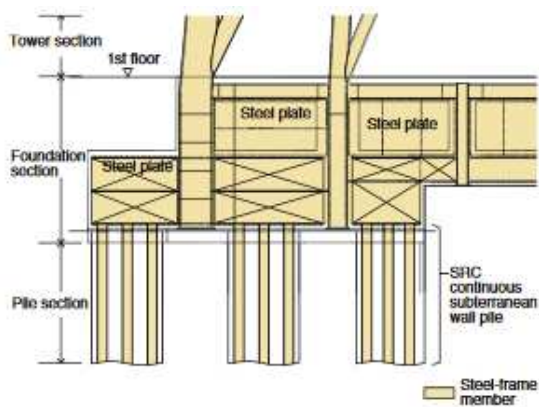
b)

Rys. 5.2.7 a Schemat rysunkowy rzutu oraz przekroju pionowego Tokyo Sky Tree

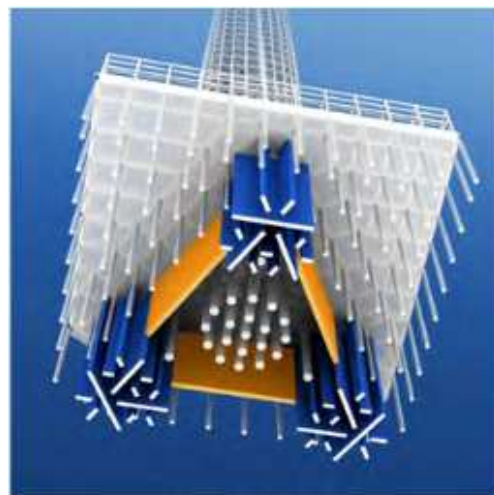
Źródło: [44]

Rys. 5.2.7 b Widok stalowej ramy powłoki zewnętrznej Tokyo Sky Tree

Źródło: [i1]



a)



b)

Rys. 5.2.8 a i b Schematy rysunkowe fundamentów wieży Tokyo Sky Tree

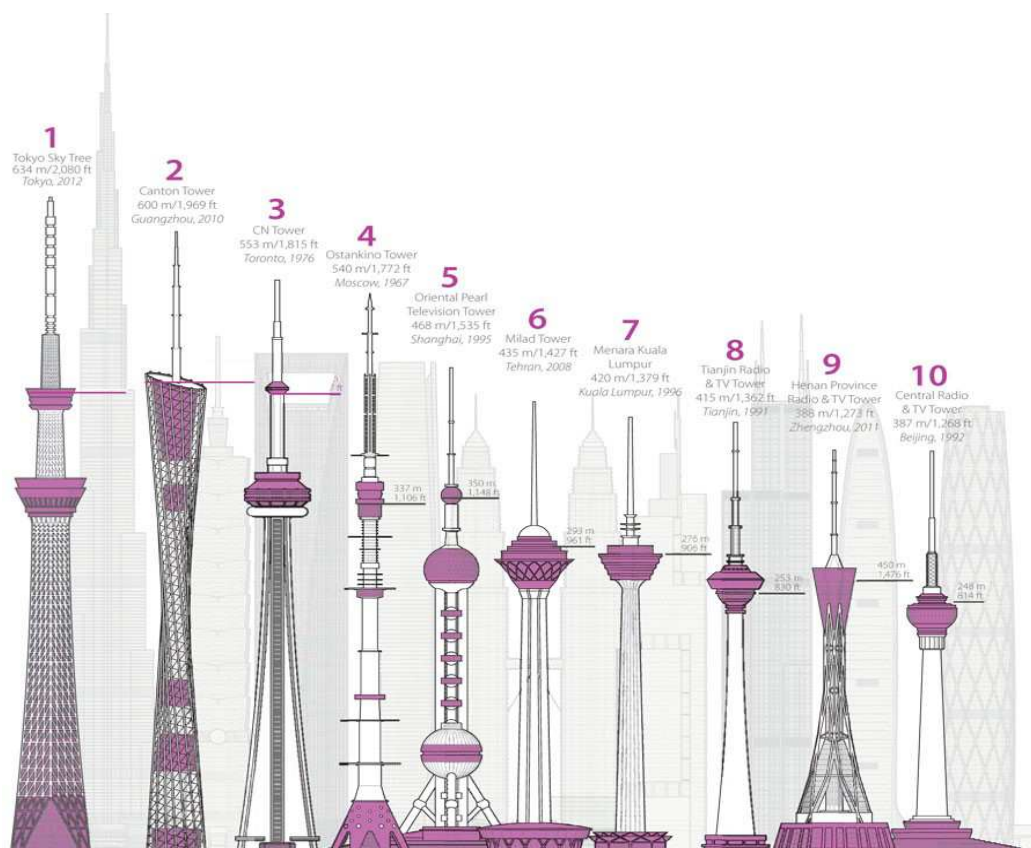
Źródło: [44, i30]



## Krótkie podsumowanie:

Obiekty wysokościowe, w tym wieże telekomunikacyjne i widokowe, podlegają podobnym uwarunkowaniom projektowym związanymi z rodzajem materiałów budowlanych, doбором systemu konstrukcyjnego, zagadnieniami aerodynamicznymi, wpływem lokalnej kultury i religii, jak budynki wysokościowe. Koherencja formy architektonicznej oraz ciekawych rozwiązań inżynierskich systemów konstrukcyjnych jest szczególnie dobitnie widoczna w obiektach wysokościowych i wieżowych. Porównanie wysokości oraz formy architektonicznej zachodzącej pomiędzy obiektami wieżowymi a budynkami wysokościowymi przedstawia poniżej zamieszczony rysunek [i1, i10, i30], na którym umieszczono 10 najwyższych budowli (Rys. 5.2.9).

Relacje zachodzące pomiędzy architekturą a konstrukcją w obiektach przedstawionych w niniejszym rozdziale są wyjątkowo spójne, co umożliwia bardzo skuteczne utrwalenie ich form w świadomości odbiorcy lub użytkownika.



Rys. 5.2.9 Relacje wysokościowe oraz kształtu bryły zachodzące pomiędzy obiektami wieżowymi oraz budynkami wysokościowymi

Źródło zaczerpniętej grafiki: [i1, i10, i30]

### 5.3. Główne ośrodki geograficzne i geopolityczne

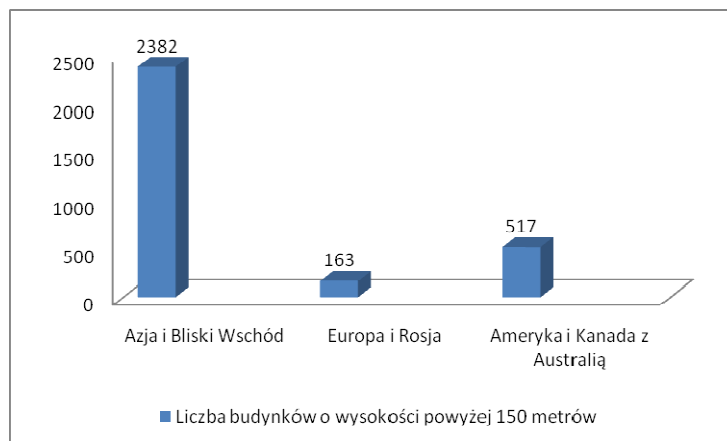
Współczesne budownictwo wysokie realizowane na przełomie XX i XXI wieku ma charakter globalny. W ubogich krajach pod względem ekonomicznym, takich jak np. państwa Afryki, nie odnotowuje się działań związanych z budową znaczących wieżowców. W pozostałej części wysoko uprzemysłowionych regionów geograficznych świata można obserwować różną intensywność działań zmierzających do realizacji budowy wysokościowców. W wielu opracowaniach naukowych globalny świat wieżowców został podzielony na kilka ośrodków geograficznych, nie tylko ze względu na ich lokalizację, ale również na dynamikę rozwoju budownictwa wysokościowego oraz uwarunkowania polityczne.

Pierwszym ośrodkiem geograficznym jest Europa wraz z Rosją, drugim to Ameryka Północna wraz z Kanadą oraz Australią, ostatnim centrum lokalizacji budynków wysokich jest Azja ze szczególnym uwzględnieniem Bliskiego Wschodu. Analiza materiałów źródłowych wykazała, że każdy z wymienionych ośrodków oznacza się nieco innymi cechami, które definiują jego indywidualny charakter.

Aby zrozumieć skomplikowane procesy związane z podziałem wysoko uprzemysłowionego świata na odrębne ośrodki geograficzne należy szczegółowo przeanalizować dynamikę budowy wieżowców na określonym terenie, rodzaj preferowanych materiałów budowlanych użytych na główny ustrój nośny obiektu, wysokość budynków, dominujące funkcje użytkowe, odniesienie do tradycji, religii, kultury lub historycznej zabudowy, formy i kształtu oraz najczęściej stosowanych systemów konstrukcyjnych.

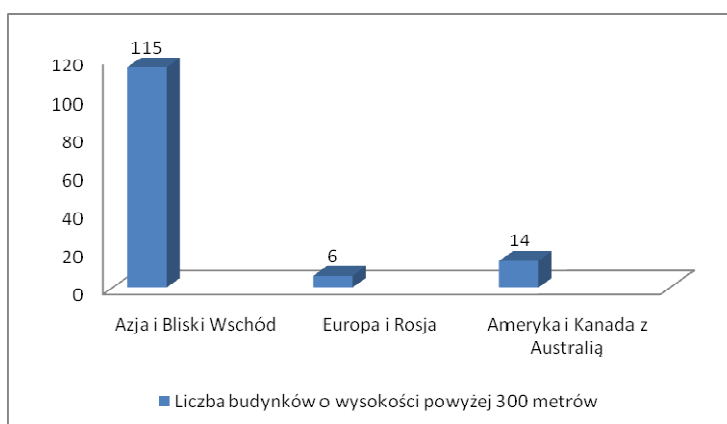
Określenie skali dynamiki budowy wieżowców można zdefiniować poprzez wyniki analiz realizacji obiektów dla przyjętych kilku przedziałów wysokościowych. Autorską propozycją jest analiza grup obiektów o wysokości co najmniej 150 metrów, 300 metrów oraz 600 metrów. Wybór takiej postaci wyodrębnionych grup budynków o określonej wysokości wynika z chęci przeprowadzenia najbardziej szczegółowej i dogłębnej analizy. W pierwszej grupie współczesnych wieżowców o wysokości co najmniej 150 metrów zrealizowanych pomiędzy rokiem 1990 a 2018 ośrodek geograficzny "Azja i Bliski Wschód" jest liderem w ilości zrealizowanych obiektów, najmniej w tym okresie czasu zrealizowano w "Europie i Rosji" (Rys. 5.3.1).

Druga analiza dotycząca danych statystycznych współcześnie wybudowanych budynków o wysokości co najmniej 300 metrów pokazuje, iż takie ośrodki jak "Europa i Rosja" oraz "Ameryka z Kanadą i Australią" mają stosunkowo niewielką dynamikę porównując je z ośrodkiem "Azja i Bliski Wschód" (Rys. 5.3.2). Ważną informacją pozyskaną z tej analizy jest to, iż spośród sześciu współczesnych budynków wybudowanych w ośrodku "Europa i Rosja", tylko jeden znajduje się w Unii Europejskiej, a pięć w Rosji. Wyróżniającym się na tle tego obszaru geograficznego jest Moskwa. Stolica Państwa Rosyjskiego stała się liderem w ilości wybudowanych budynków wysokich w ostatnich trzech dekadach o wysokości co najmniej 300 metrów. Trzecia synteza wyników badań obiektów o wysokości co najmniej 600 metrów wykazała, iż tylko w ośrodku geograficznym "Azja i Bliski Wschód" były realizowane przedmiotowe budynki (Rys. 5.3.3).



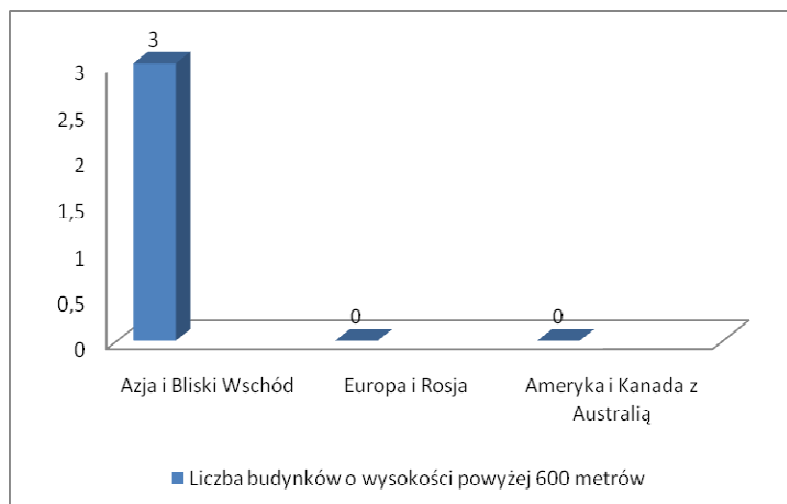
Rys. 5.3.1 Liczba budynków o wysokości powyżej 150 metrów wybudowanych pomiędzy rokiem 1990 a 2018

Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]



Rys. 5.3.2 Liczba budynków o wysokości powyżej 300 metrów wybudowanych pomiędzy rokiem 1990 a 2018

Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]

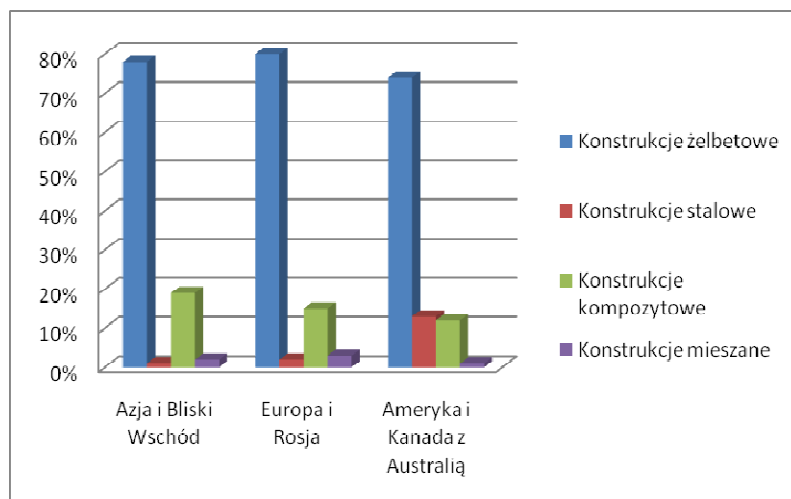


Rys. 5.3.3 Liczba budynków o wysokości powyżej 600 metrów wybudowanych pomiędzy rokiem 1990 a 2018

Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]

Kolejnym czynnikiem definiującym indywidualizm poszczególnych ośrodków geograficznych jest preferowany rodzaj materiału z jakiego wykonuje się główny ustrój nośny budynku. Do analizy przyjęto warunek brzegowy związany z wysokością budynku wynoszącą co najmniej 150 metrów, co pozwoliło wykazać tendencje projektowe na dużej próbie badawczej. Uzyskane wyniki wskazują, iż w każdym z wyodrębnionych ośrodków, konstrukcje żelbetowe lub kompozytowe są dominujące przy budowie współczesnych wieżowców realizowanych w latach 1990 a 2018. Jedyną istotną różnicą pomiędzy ośrodkami to wielkość określona w procentach, dotycząca realizacji wieżowców w konstrukcjach stalowych. Jedynym ośrodkiem, w którym obserwuje się takie realizacje jest ośrodek "Ameryka z Kanadą i Australią". W pozostałych obszarach geograficznych liczba wybudowanych budynków o ustroju nośnym metalowym jest marginalna (Rys. 5.3.4).

O dominacji różnych form konstrukcji żelbetowych we współczesnych obiektach wysokich wybudowanych w ostatnich trzech dekadach świadczy fakt, iż wśród 10 najwyższych budynków świata osiem zostało zrealizowanych przy zastosowaniu ustrojów kompozytowych, a dwa, jako układy mieszane żelbetowo-stalowe.



Rys. 5.3.4 Udział wybranych rodzajów konstrukcji stosowanych w budynkach wybudowanych pomiędzy rokiem 1990 a 2018

Źródło: [opracowanie własne na podstawie danych z i1]

Najwyższym obecnie budynkiem wykonanym w konstrukcji mieszanej (stal + żelbet) to Burj Khalifa, (Rys. 5.3.5), o wysokości 828 metrów wybudowany w 2010 roku. W konstrukcji kompozytowej najwyższym budynkiem jest Shanghai Tower, (Rys. 5.3.6), o wysokości 632 metrów wybudowany w 2015 roku. Wieżowiec o nazwie Marina 101 (Rys. 5.3.7), wybudowany w Dubaju w 2017 roku jest najwyższym budynkiem na świecie wykonanym w konstrukcji żelbetowej. W ostatnich trzech dekadach współczesnym obiektem wykonanym w konstrukcji stalowej jest The Center (Rys. 5.3.8), w Hongkongu o wysokości 346 metrów.



Rys. 5.3.5 Burj Khalifa  
Źródło: [i1]



Rys. 5.3.6 Shanghai Tower  
Źródło: [i1]



Rys. 5.3.7 Marina 101  
Źródło: [i1]



Rys. 5.3.8 The Center  
Źródło: [i1]

Ważną informacją z przeprowadzonej analizy jest to, iż wśród 50 najwyższych budynków świata, tylko 4 znajdują się w ośrodku "Ameryka z Kanadą i Australią". W obszarze "Europa wraz z Rosją" dwa wieżowce znajdują się na liście 50 najwyższych obiektów zrealizowanych w ostatnich trzech dekadach. Oba budynki znajdują się w stolicy Rosji, w Moskwie. Są nimi Federation Tower (Rys. 5.3.9) oraz OKO - Residential Tower (Rys. 5.3.10). Pozostałe miejsca na wspomnianej liście zajmują budynki w Azji i na Bliskim Wschodzie.



Rys. 5.3.9 Federation Tower  
Źródło: [i1]



Rys. 5.3.10 OKO - Residential Tower  
Źródło: [i1]

Kolejną cechą określającą indywidualizm poszczególnych ośrodków geograficznych jest odniesienie do tradycji, kultury, religii lub poszanowania istniejącej historycznej tkanki miejskiej względem formy architektonicznej współczesnego budynku wysokiego. W krajach takich jak Azja i Bliski Wschód odnajdujemy wiele przykładów budynków wysokich, w których projekt wieżowca był inspirowany motywami zaczerpniętymi z lokalnej tradycji, kultury i religii. Europa jako ośrodek geograficzny i geopolityczny wybrała inny model budownictwa wysokiego. Polega on na, jak już uprzednio to wspomniano, poszanowaniu istniejącej tkanki miejskiej ze szczególnym uwzględnieniem zabytkowych centrów miast. Zaprojektowane formy współczesnego wieżowca mają zazwyczaj klasyczne kształty prostopadłościenne. Niekonwencjonalne lub futurystyczne formy wieżowca są realizacjami wyjątkami potwierdzającymi regułę. Europa wybrała model budownictwa wysokiego zrównoważony, co manifestuje się działaniami proekologicznymi i stosowaniem nowoczesnej technologii. W krajach europejskich nie występuje nurt budowania wieżowców najwyższych, które można określić jako mega-wysokie. Dominują obiekty o wysokości nie większej niż 300-350 metrów. Ograniczenie wysokości wieżowców europejskich przekłada się na wybór rodzaju systemów konstrukcyjnych. Analizy własne wykazały, iż najczęściej wybranym systemem są układy trzonowe wraz z różnymi modyfikacjami oraz stroje powłokowe i dwu powłokowe określone także terminem "*trzon w trzonie*".

Nieco inaczej wyglądają obiekty wysokie w Azji i na Bliskim Wschodzie. W tym ośrodku często są projektowane obiekty o zakrzywionych lub skręconych formach architektonicznych. Należy przypuszczać, iż wynika to z pragnienia zaprojektowania i wybudowania obiektu, który może utrwalić się w świadomości globalnej, będzie rozpoznawalnym symbolem właściciela lub stanie się "ikoną budownictwa wysokiego".

### **Krótkie podsumowanie:**

Współczesne budownictwo wysokie odznacza się dużą dynamiką rozwoju form architektonicznych oraz ewolucji stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i technicznych. W okresie ostatnich prawie 150 lat ewolucji budynków wysokich można obserwować szybki rozwój wielu dziedzin projektowych związanych z

wieżowcami. Po katastrofie związanej ze zniszczeniem bliźniaczych wież World Trade Center w Nowym Jorku wielu analityków przypuszczało, iż jest to moment przełomowy w budownictwie wysokościowym, po którym nastąpi odwrót od budowania obiektów wysokich. Obecna dynamika realizacji wieżowców przeczy tej hipotezie.

W każdej uprzemysłowionej części świata można zaobserwować proces budowy obiektów o dużych wysokościach. Dynamikę budownictwa wysokiego można objąć w ramach umownej skali zależnej od miejsca lokalizacji budowy wieżowca. Przyjęty w niniejszej pracy doktorskiej podział świata globalnego na trzy ważne ośrodki geograficzne, biorąc pod uwagę przyjęte kryteria doboru, należy uznać za racjonalny i odpowiadający rzeczywistości. Każdy z omówionych ośrodków posiada swoje indywidualne cechy, które pozwalają realizować odmienne modele procesu projektowego i wykonawczego związanego z konstruowaniem budynku wysokiego. Różne modele opisujące proces powstawania „drugiego poziomu miasta” , jakim jest wieżowiec umożliwiają zaprojektowanie obiektu „ikonicznego”, który utrwali się w świadomości globalnej.

#### **5.4. Nakreślenie przewidywanych tendencji rozwojowych współczesnych budynków wysokich**

Rozwój budownictwa wysokiego na przestrzeni ostatnich blisko 150 lat od początku związany był z systematyczną i ciągłą ewolucją tendencji projektowych. Rozwój cywilizacyjny dotyczy również procesu ewolucji budynków wysokościowych. To w nich wprowadza się najbardziej innowacyjne rozwiązania techniczne, które później aplikuje się do obiektów niższych. Rozwój technik matematyczno-obliczeniowych pozwolił na znaczące podniesienie poziomu wiedzy i możliwości działań inżynierskich. Wielopłaszczyznowe i powierzchniowe formy architektoniczne współczesnych budynków mogły zostać zrealizowane przy pomocy stosowania rozwiniętych technik komputerowych.

Wyniki wielu badań naukowych wskazują na możliwość redukcji niekorzystnych zjawisk aerodynamicznych między innymi dobór odpowiedniego kształtu rzutu poziomego budynku wysokiego [18]. Realizacja zmian projektowych w obrębie narożnika budynków poprzez jego wyoblenie, ścięcie lub zaokrąglenie



przynosi duże korzyści związane z ograniczeniem naprężeń w elementach nośnych oraz pozwala racjonalnie zoptymalizować wymiary geometryczne ustroju nośnego wieżowca. Oprócz obserwowanego zjawiska związanego z rywalizacją o wybudowanie najwyższego obiektu można dostrzec tendencję do projektowania wieżowców o dotychczas niespotykanych formach architektonicznych.

Kształtowanie bryły budynku z uwzględnieniem różnego rodzaju wewnętrznych otworów przelotowych, jak w budynkach Perl River Tower oraz The Razor, należy do jednej ze współczesnych metod projektowania wieżowców spełniających założenia pojęcia „*eco-tech*”.

Dane statystyczne wskazują, iż za 30% całkowitego zużycia energii na świecie odpowiadają wszelkiego rodzaju budynki. Na całym świecie podejmowana jest tematyka architektury energooszczędnej, która wpisuje się w pojęcie rozwoju zrównoważonego. Stosowanie odnawialnych źródeł energii w budynkach jest obecnie nie tylko chwilowym nurtem projektowym, ale trwałą tendencją. Projektowanie turbin wiatrowych, ogniw fotowoltaicznych, paneli solarnych lub stosowanie energii geotermalnej w budynkach wysokich nie jest niczym nadzwyczajnym. Inwestorzy chcący zrealizować swoje zamierzenie inwestycyjne dążą do maksymalizacji bilansu finansowego uwzględniając idee budynku zero-energetycznego. Idea zaprojektowania budynku, który nie będzie potrzebować energii z źródeł kopalnianych, tylko sam wyprodukuje stosowaną ilość na własne potrzeby jest nie tylko czystą kalkulacją finansową, ale również i prestiżową. Od momentu wybudowania pierwszych wieżowców w Chicago i Nowym Jorku do dnia dzisiejszego budynki wysokie są symbolem prestiżu, bogactwa, wielkości oraz potęgi finansowej i politycznej ich właścicieli. Takie uwarunkowania sprzyjają rozwijaniu i doskonaleniu technik projektowych pozwalających na ograniczenie zużycia energii niezbędnej do wybudowania oraz późniejszej wymaganej do zużycia podczas eksploatacji budynku wysokiego. Innowacyjne pojęcia „*eco-tech*” i „*high-tech*” stają się nieodłączną tendencją w projektowaniu i realizowaniu współczesnych wieżowców. Wysokościowce lokowane są na ogół w centrach dużych aglomeracji miejskich, gdzie mieszkańcy lub użytkownicy budynków oczekują coraz większego kontaktu z naturą. Budownictwo z lat 70-tych i 80-tych XX wieku było nastawione

na projektowanie obiektów często określanych, jako „surowych”, ze względu na funkcje, którymi na ogół były biura.

We współczesnym budownictwie wysokościowym widoczne jest odejście od tego typu rozwiązań na rzecz architektury bioklimatycznej. Kenneth Yeang najślynniejszy teraz architekt związany z nurtem pro-ekologicznym projektuje obiekty takie jak Castle Towers, Armoury Tower i wiele innych, które mają być w założeniu przyjazne człowiekowi. Mają być odpowiedzią na potrzeby obcowania człowieka z naturą, ale nie w postaci „sztucznych” tworów, typu małe poletka z trawką lub drzewa w donicach. Nurt projektowy współczesnych wieżowców dąży do stworzenia bio-klimatycznej przestrzeni, w której człowiek będzie mógł żyć i pracować. Prekursorem wieżowca, od którego rozpoczęła się era budynków „*eco-tech i high-tech*” jest Commerzbank we Frankfurcie nad Menem. Architekci po raz pierwszy na tak dużą skalę zaprojektowali wielokondygnacyjne ogrody, aby między innymi poprawić komfort przebywania w budynku. W dalszych poszukiwaniach oszczędności w zużyciu energii przez budynek oraz w celu zapewnienia użytkownikom możliwie największego kontaktu z naturalnym otoczeniem wprowadzono system podwójnych fasad. Rozwiązanie to pozwala użytkownikowi na kontakt z powietrzem otoczenia nawet na znacznych wysokościach wynoszących kilkaset metrów nad ziemią. System podwójnych fasad spełnia równocześnie wiele równorzędnych funkcji. Oprócz wspomnianego kontaktu człowieka z powietrzem, w momencie otwarcia przegrody wewnętrznej, kiedy zewnętrzna fasada stanowi barierę zabezpieczającą użytkownika, możliwe jest uzyskanie korzystnego bilansu cieplnego wnętrza. Oszczędności w zużyciu energii na klimatyzację oraz ogrzewanie wynikają z zastosowanego rozwiązania „mieszanego”, które umożliwia wentylację pomieszczeń w sposób grawitacyjny, pozwala na ograniczenie w korzystaniu z urządzeń klimatyzacyjnych oraz grzewczych. Jednym w wielu rozwiązaniach technicznych związanych z ochroną środowiska i spełnieniem postulatów zrównoważonego rozwoju są zaawansowane technologicznie systemy grawitacyjne zbierające i następnie filtrujące wodę opadową, którą powtórnie wprowadza się do obiegu instalacyjnego budynku wysokiego. Celem zbierania deszczówki do specjalnie przygotowanych zbiorników, które często mogą pełnić funkcję tłumików drgań własnych budynków, jest ich ponowne wykorzystanie również do podlewania

roślinności „podniebnych ogrodów”, mycia szklanych elewacji lub zastosowanie w wewnętrznej instalacji sanitarnej np. w ubikacjach.

Współczesną odpowiedzią na postawione uwarunkowania pro-ekologiczne jest wybudowany w 2015 roku jeden z najwyższych budynków na świecie, jakim jest Shanghai Tower w Chinach. Poza szeregiem rozwiązań technicznych związanych z realizacją postulatów stosowania zaawansowanych technologii w budynku tym prawie 33% powierzchni całkowitej wieżowca stanowią tereny zielone. Rozwiązania bio-klimatyczne nieodłącznie są i będą związane z pojęciem „budynku inteligentnego”. Obie dziedziny projektowe nie są w stanie efektywnie wzbogacać budynek bez ścisłej wzajemnej współpracy pomiędzy sobą. Wieżowiec Shanghai Tower o wysokości 632 metrów jest nie tylko aplikacją współczesnych tendencji projektowych budynków wysokich związanych z pojęciami pro-ekologicznymi oraz „*high-tech*”, ale poprzez intrygującą formę zakrzywionej osi elewacji spełnia postulaty ograniczenia niekorzystnych zjawisk aerodynamicznych. Przedstawiona w niniejszej pracy synteza wyników badań, dotyczących poszukiwania najbardziej pożądanych kształtów budynków wysokich, jest wynikiem analiz zjawisk zachodzących wokół budynku w wyniku parcia lub ssania wiatru.

Analiza materiałów źródłowych oraz własny przegląd projektów wielu budynków na świecie, w szczególności tych, które mają cechy pozwalające im przypisać pojęcie „budynku ikonicznego” pozwala na przedstawienie dodatkowej klasyfikacji budynków pod względem coraz częściej występujących współczesnych form architektonicznych budynków wysokich. Tendencją projektową, która będzie miała globalne znaczenie przy kształtowaniu formy elewacji wieżowca jest pragnienie stworzenia obiektu, który będzie unikatowy i zapamiętywany przez ludzi na całym świecie. Typowe klasyczne kształty prostopadłościenne lub owalne aplikowane w budynkach w szczególności w latach 70-tych i 80-tych XX wieku, które najczęściej powstały w kolebce wieżowców jakimi są Stany Zjednoczone, wciąż są akceptowane na całym świecie.

W dynamicznie rozwijającym się ośrodku geograficznych i politycznych, jakim jest Azja i Bliski Wschód, można zaobserwować tendencje projektowania wieżowców o skomplikowanych formach geometrycznych. Wśród nich można wyróżnić wielościany, elipsoidy, torusy, załamane lub skręcone stożki i walce.

Forma krzywoliniowych powierzchni częściej jest aplikowana w elewacjach współczesnych wieżowców w Azji lub na Bliskim Wschodzie niż w Europie lub Stanach Zjednoczonych. Budynki o trudno zdefiniowanym kształcie, których forma powstała w wyniku zniekształceń lub załamania bryły i powierzchni, można przypisać do następujących grup: **Rotors**, **Twisters**, **Tordos**, **Slicers** oraz **Free shapers** [21, 85].

Budynki, które można zaliczyć do grupy „Rotors” oznaczają się formą, która powstała w wyniku obrotu płaskich kształtów względem własnej osi obrotu w układzie ortogonalnym lub pochylonym. Reprezentatywnymi obiektami definiującymi grupę „Rotors” są Mode Gakuen Cocoon Tower, (Rys. 5.4.1), w Japonii, Swiss Re, (Rys. 5.4.2), w Wielkiej Brytanii, Torre Agbar, (Rys. 5.4.3), w Hiszpanii.



Rys. 5.4.1  
Mode Gakuen Cocoon Tower  
Źródło: [i1]



Rys. 5.4.2  
Swiss Re  
Źródło: [i1]



Rys. 5.4.3  
Torre Agbar  
Źródło: [i1]

Wieżowce należące do grupy „Twisters i Tordos” posiadają formy skrzyżowane będące wynikiem obrotu, obserwowanego w rzucie poziomym, sąsiadujących ze sobą kondygnacji o pewien zwykle niewielki kąt względem siebie, przy zachowaniu układu ortogonalnego trzonu. W tej grupie można wyróżnić obiekty, takie jak Cayan Tower (Rys. 5.4.4), w Zjednoczonych Emiratach Arabskich, Shanghai Tower (Rys. 5.4.5), w Chinach, Mode Gakuen Spiral Towers (Rys. 5.4.6), w Japonii.



Rys. 5.4.4  
Cayan Tower  
Źródło: [i1]



Rys. 5.4.5  
Shanghai Tower  
Źródło: [i1]



Rys. 5.4.6  
Mode Gakuen Spiral Towers  
Źródło: [i1]

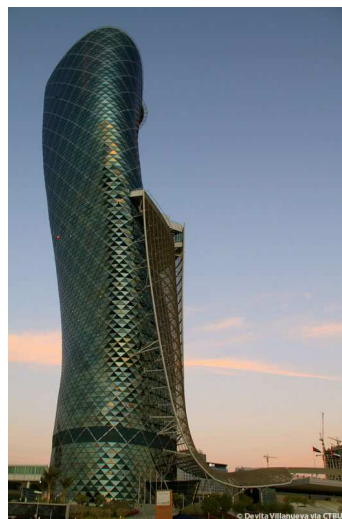
Do grupy „Slicers” zalicza się budynki, które mają formę zakrzywionej fasady poprzez zastosowaną zmienną geometrię balkonów, tarasów lub innych elementów wspornikowych. Reprezentatywnymi przykładami są Aqua Tower (Rys. 5.4.7), w USA oraz Absolute World Building (Rys. 5.4.8), w Kanadzie. Wiele budynków wysokich jest projektowanych poprzez kombinację ułożenia różnych brył i powierzchni względem siebie, które trudno zakwalifikować do podanych wcześniej grup. Do takich obiektów można zaliczyć np. Capital Gate (Rys. 5.4.9), w Zjednoczonych Emiratach Arabskich.



Rys. 5.4.7  
Aqua Tower  
Źródło: [i1]



Rys. 5.4.8  
Absolute World Building  
Źródło: [i1]



Rys. 5.4.9  
Capital Gate  
Źródło: [i1]

Kolejną z zaobserwowanych tendencji w projektowaniu współczesnych budynków wysokich, co potwierdziły wyniki analiz statystycznych w rozdziale nr 3.6, jest dążenie do wyboru konstrukcji nośnych wieżowca z dominującym udziałem betonu, takich jak ustroje kompozytowe, żelbetowe oraz żelbetowo-stalowe. Rozwój technologii betonu oraz nowe techniki przemieszania pionowego mieszanki betonowej na duże wysokości przyczyniły się do powolnego odchodzenia od ustrojów wyłącznie stalowych.

### **Krótkie podsumowanie:**

W projektowaniu współczesnych wieżowców można wyróżnić kilka wiodących nurtów, takich jak dążenie do działań pro-ekologicznych spełniających zasady rozwoju zrównoważonego i przy jednoczesnym stosowaniu zasad „eco-tech” dotyczących rozwiązań budynku inteligentnego – „*high-tech*”, oraz na uwzględnieniu w procesie projektowania zagadnień aerodynamicznych.

Próba określenia wszystkich dominujących tendencji projektowych współczesnych budynków jest trudna, gdyż wizje architektów oraz możliwości techniczne rzemiosła inżynierskiego są nadal niewyczerpane.

Autorska analiza przyszłych nurtów w projektowaniu wieżowców zawarta w niniejszym podrozdziale w niedługim czasie będzie wymagać zaktualizowania ze względu na duży potencjał rozwoju budynków wysokich.

## 6. Podsumowanie i wnioski końcowe

W niniejszej rozprawie doktorskiej przedstawiono wyniki analiz porównawczych wieżowców oraz badań własnych nad zachodzącymi relacjami pomiędzy ewolucją formy architektonicznej, a kształtowaniem ustrojów nośnych współczesnych budynków wysokich. Na podstawie istniejących materiałów polsko- i angielskojęzycznych, zawierających aktualny stan wiedzy w zakresie przedmiotowym, sformułowano dwie tezy badawcze tej dysertacji. W celu udowodnienia postawionych tez przeprowadzono szczegółowe badania istniejących uwarunkowań projektowych budynków wysokich oraz dokonano ich analizy porównawczej na już wybudowanych obiektów wysokich. Na podstawie wyników analiz dużej liczby reprezentatywnych przykładów, w których zastosowano wiodące systemy konstrukcyjne oraz w rezultacie przeprowadzenia analizy wielokryterialnej zagadnień dotyczących formy architektonicznej budynków wysokich i jej strukturalnych determinant wyodrębniono wiele ważnych i intrygujących zależności.

Szczegółowa weryfikacja stosowanych rozwiązań form architektonicznych i ustrojów konstrukcyjnych ukończonych wieżowców, przyjętych jako podstawa dla szeroko zakrojonych analiz szczegółowych, umożliwiła nakreślenie przewidywanych tendencji rozwojowych oraz odpowiadających im nurtom projektowym współczesnych budynków wysokich.

Wyniki autorskich badań wraz z analizą porównawczą budynków wysokich wybudowanych w znaczących ośrodkach geograficznych i politycznych oraz pozyskane dane statystyczne umożliwiają sformułowanie następujących wniosków końcowych:

1. Rozwój budownictwa wysokiego na świecie jest związany z ciągłym poszukiwaniem atrakcyjnych form architektonicznych oraz nowatorskich rozwiązań konstrukcyjnych takich budynków.
2. Wieżowce od czasów antycznych do dnia dzisiejszego są utożsamiane ze spektakularną manifestacją prestiżu, bogactwa oraz wysokiej pozycji społecznej i politycznej ich inwestorów.
3. Projektowanie współczesnych budynków wysokich jest związane z wieloma czynnikami warunkującymi nadanie projektowanemu obiektowi indywidualnej i

unikatowej formy architektonicznej. Ich odpowiednie stosowanie umożliwi takie jej kształtowanie, aby z dużym prawdopodobieństwem dany budynek mógł być niemal natychmiast i jednoznacznie rozpoznawalny przez odbiorców architektury na całym świecie oraz miał szansę na uzyskanie statusu „*obiekту ikonicznego budownictwa wysokiego*”.

4. Dominującymi obciążeniami działającymi na budynki wysokie są oddziaływania wynikające z parcia lub ssania wiatru, klasyfikowane jako oddziaływania dynamiczne. Realizacja obiektów coraz wyższych wymaga stosowania odpowiednich systemów konstrukcyjnych zapewniających odpowiednią sztywność przestrzenną oraz takich, które równocześnie nie będą stanowić istotnych ograniczeń w procesie kształtowania formy architektonicznej wieżowca.

5. Inżynierskie narzędzia projektowe służące do modelowania współczesnych systemów konstrukcyjnych, takie jak: zaawansowane programy do analiz statyczno-dynamicznych oraz badania modeli obiektów w tunelach aerodynamicznych, pomagają w doborze korzystnych form architektonicznych.

6. Wyniki badań teoretycznych oraz analitycznych, będących podstawą do prowadzenia rozważań w niniejszej rozprawie, wskazują na potrzebę stosowania opływowych lub złagodzonych krawędzi elewacji budynku.

7. Budynki wysokie zgodnie z podstawowymi regułami teorii konstrukcji i statyki, są smukłymi pionowymi wspornikami sztywno utwierdzonymi w fundamencie. Siły wewnętrzne działające w elementach konstrukcji obiektu o bardzo dużej wysokości, spowodowane oddziaływaniem obciążeń zewnętrznych o znacznych wartościach obliczeniowych skłaniają projektantów do przyjmowania klasycznej formy wieżowca zbliżonej do bryły ostrosłupowej.

8. Budynki wysokie, podobnie jak przykrycia o dużej rozpiętości, są szczególnymi rodzajami obiektów, w których determinanty strukturalne odgrywają dominującą rolę w procesie kształtowania formy architektonicznej.

9. Zebrany materiał źródłowy oraz zamieszczona synteza wyników z badań potwierdzają słuszność postawionych tez w niniejszej rozprawie doktorskiej.



## 7. Spis literatury podstawowej

- [1] Abramowicz M., Terlikowski W., Związek między konstrukcją, formą i funkcją w kształtowaniu budynków użyteczności publicznej. *Materiały Budowlane* 6/2008(nr.430).
- [2] Ali Mir. M., Moon K., Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends And Future Prospects. *Architectural Science Review.*, Vol. 50.3, pp. 205-223.
- [3] Antecki P., Wdowicki J. Budynek Di-Wang Tower – konstrukcja i obliczenia. *Inżynieria i Budownictwo* nr. 3/2011.
- [4] Augustyn J., Giżejowski M., Konstrukcje stalowe – osiągnięcia i perspektywy., *Inżynieria i Budownictwo* nr. 9/98.
- [5] Baker B., Pawlikowski J. The Design and Construction of the World`s Tallest Building: The Burj Khalifa, Dubai. *Structural Engineering International* 4/2015.
- [6] Baker W., Korista D., Novak L. Engineering the World`s Tallest – Burj Dubaj. CTBUH 8 World Congress, Dubai, 3-5 March 2008.
- [7] Bączkowski B., Wysokie budynki mieszkalne w Hongkongu. *Inżynieria i Budownictwo* 6/2007.
- [8] Besjak C., Biswas p., Petrov G., Streeter M., Devin A., Effects of Perimeter to Core Connectivity on Tall Building Behavior. *International Journal of High-Rise Buildings*. March 2017, vol. 6, No 1, 1-9.
- [9] Błaszczyński T., Gwozdowski B., Budynki wysokie – w dążeniu do zero energetyczności. *Builder* 30, maj 2016.
- [10] Bosak G., Badania modelowe działania wiatru na budynek wysoki. *Budownictwo i Architektura* 13(2) (2014) 163-171.
- [11] Borusiewicz W., Konstrukcje Budowlane dla Architektów. Arkady 1978.
- [12] Cała J., Józwik A. Głębokie posadowienie budynków wysokich. *Materiały Budowlane* 2/2017(nr.534).
- [13] Celadyn W., Przegrody Przeszkłone w Architekturze Energooszczędnej. Wydawnictwo Politechniki Krakowska, Kraków 2004.
- [14] Dupre J., Skyacrapers. Published by Black Dog& Leventhal 1996.
- [15] Dzięgielewski A., Jaskulski R., O pewnym kryterium sztywności przestrzennej budynków wysokich. *Inżynieria i Budownictwo* nr 11/2002.

- [16] Dziegielewski P., Czy metody wznoszenia nadążają za budynkami wysokimi?. Przegląd Budowlany 12/2012.
- [17] Elnimeiri M., Dubai Tower 29, Structure and Form. CTBUH 8-th World Congress 2008.
- [18] Flaga A., Romańczuk W., Redukcja niekorzystnych wpływów aerodynamicznych na budynki wysokie. Inżynieria i Budownictwo nr. 4-5/2000.
- [19] Flaga A.: Inżynieria wiatrowa. Arkady, Warszawa 2008.
- [20] Foster N., Luff S., Wisco D., Green SkyScrapers. What is being built, and why?. A report for CRP 3840: Green Cities. December 4, 2008.
- [21] Gasiński K., Koncepcja budynku o wysokości 1000 metrów w tle Światowego Budownictwa Wysokiego. Czasopismo Inżynierii Lądowej. T. XXXII, z. 62(4/15), październik – grudzień 2015, s. 55-71.
- [22] Gawell E., Nowak A., Pietrzak J., Modeling of Bioclimatic Skyscrapers`Facades With Generative Design Methods. Czasopismo Techniczne. Budownictwo. 5-B/2014.
- [23] Glinicki M., Ładyżyński K., Beton towarowy w budowie obiektów wysokich. Polski Cement. Numer specjalny – maj 2002.
- [24] Górski M., Kozłowski A., Kozłowski T., Ludera P., Analiza układu stężającego budynku wysokościowego o konstrukcji betonowej. Czasopismo Inżynierii Lądowej, środowiska i Architektury t.XXXII, z. 62(3/II/15), Lipiec-wrzesień 2015, s. 105-117.
- [25] Grela M. Pentominium - Najwyższy apartamentowiec świata o wysokości 516m jako przykład głębokiego fundamentowania. Budownictwo Inżynieryjne / Geoinżynieria 4/2011.
- [26] Gwozdowski B., Wdowicki J. Błaszczynski T., Budynek wysoki Shanghai World Financial Center(SWFC) – konstrukcja i analiza obliczeniowa. Inżynieria i Budownictwo nr.10/2013.
- [27] H K HO Paul, Hong Kong SAR China, „Economics Planning of Super Tall Buildings in Asia Pacific Cities”.
- [28] Hayashida H., Iwasa Y. “Aerodynamic shape effects of tall building for vortex induced vibration. Kyoto 1988, Japan.

- [29] Irwin P., Wind Issues in the design of tall buildings. Los Angeles Tall Building Structural Design Council. May 7, 2010.
- [30] Januszkiewicz K., Zwierzycki M., Wrażliwa skora. Wieże Al. Bahar Towers, Abu Dhabi, ZEA. Archivolta 1/2013, s. 10-23.
- [31] Jasiński A. Znaczenie Budynków Wysokich i Wysokościowych we Współczesnej Urbanistyce. Przestrzeń i Forma`10.
- [32] Kapela M., Sieczkowski J., Projektowanie konstrukcji budynków wielokondygnacyjnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2003.
- [33] Kłosiński B., O projektowaniu posadowień budynków wysokich., Inżynieria i Budownictwo nr. 3/2009.
- [34] Kłosiński B., Fundamenty budynków wysokich – doświadczenia z realizacji krajowych. Inżynieria i Budownictwo nr.11/2015.
- [35] Khan F.R., Rankine J.: Structural Systems. Tall Building Systems and Concepts, Council on Tall Buildings and Urban Habitat/American Society of Civil Engineers, Vol. SC, p. 42, 1980.
- [36] Kłosiński B., Rychlewski P. Fundamentowanie budynków wysokich. Materiały Budowlane nr 3/2012( nr. 475).
- [37] Kozłowski A., Bródka J. Stalowe Budynki Szkieletowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2003.
- [38] Ksit B., Waltrowska M., Budynki wysokie zrównoważone ekologicznie. Inżynier budownictwa lipiec/sierpień 2014 (119).
- [39] Kumorek M., Analiza Rozwoju Budownictwa Wysokiego. Przestrzeń i Forma`14.
- [40] Kwok M., Lee A., Engineering of Guangzhou International Finance Center. International Journal of High-Rise Buildings. December 2016, Vol 5, No 4, 49-72.
- [41] Kwok K.C.S Aerodynamics of tall buildings, A State of the Art. In Wind Engineering. Wiley Eastern Limited. New Delhi, January 1995.
- [42] Lipiecki T., Oddziaływanie wiatru na budynki wysokie w świetle badań własnych i ujęć normowych. Budownictwo i Architektura 12(2) (2013) 143-150.
- [43] Melbourne W.H. Bluff body aerodynamics for wind engineering. International Conference on Wind Engineering. New Delhi, January 1995.

- [44] Morita K., Keii M, Tokyo Sky Tree. Special Issue, Steel Construction Today & Tomorrow, no. 31, November 2010.
- [45] Mroczek J.: Inteligentny budynek - dziś i jutro, Przyjazna idea. Inteligentny Budynek Integracja Systemów, nr 1, 1998.
- [46] Musiał R., Bardzo wysokie budynki – dzisiejsze I przyszłe element krajobrazów wielkich miast w Europie. Czasopismo Techniczne, 1-A/1/2012.
- [47] Niezabitowska E. Metody i techniki badawcze w architekturze. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2014.
- [48] Padewska A., Szczepaniak P., Wawrzynek A., Oddziaływanie wiatru na obiekt o nietypowym kształcie. Inżynieria i Budownictwo nr. 7/2015.
- [49] Parker D., Wood A., The Tall Buildings Reference Book., Routledge Taylor&Francis Group.
- [50] Paruch R., Kształtowanie budynków wysokich w świetle pewnych badań i analiz związanych z oddziaływaniem wiatru. Mechanik Xxx/2017.
- [51] Paruch R. Oddziaływanie wiatru na budynek wysoki w aspekcie rozwoju form architektonicznych i systemów konstrukcyjnych. Mechanik nr 7/2016.
- [52] Pawłowski A.Z., Cała I., Wieżowce rekordowych wysokości. Rola betonu w nowych systemach konstrukcyjnych. Budownictwo październik-grudzień 2013.
- [53] Pawłowski A.Z., Cała I., Budynki wysokie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- [54] Pawłowski A.Z., Cała I., Rozwój wysokich budynków mieszkalnych na świecie. Materiały Budowlane nr. 5/2007.
- [55] Pawłowski A.Z., Cała I., Wysokie budynki mieszkalne w krajach UE. Materiały Budowlane nr. 5/2007.
- [56] Pawłowski A.Z., Cała I. Ściany osłonowe wieżowców. Materiały Budowlane nr.11/2008.
- [57] Pawłowski A.Z., Cała I. Wysokie budynki hotelowe i mieszkalne. Materiały Budowlane nr.5/2008(nr.429).
- [58] Pawłowski A.Z., Cała I., Hila J. Wieżowce Warszawy. Materiały Budowlane nr. 2/2005.
- [59] Pawłowski A.Z., Budynki wysokie – wzrastająca rola betonu. Budownictwo, Technologie, Architektura. Styczeń – marzec 2004.

- [60] Pawłowski A.Z., Cała I. Rozwój konstrukcji wieżowców europejskich – dominacja betonu. Materiały Budowlane nr 7/2003 (nr.371).
- [61] Peroutka H., Wymogi dotyczące wyposażenia technicznego budynków wysokich.
- [62] Pietrzak J. Wybrane przykłady europejskich budynków wysokich o funkcji administracyjno-biurowej – Kreowanie komfortu użytkowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Architektura z.53 nr. kol. 1889.
- [63] Piszczek T., Przykład zastąpienia przeciążonych elementów żelbetowych elementami zespolonymi stalowo-żelbetowymi. Inżynieria i Budownictwo nr. 3/2015.
- [64] Praca Zbiorowa, Najwyższe Budowle Świata., Bellona, Warszawa 2013.
- [65] Praca Zbiorowa, Seminarium „Głębokie Posadowienie Budynków Wysokich”. Warszawa 23 czerwca 2008r.
- [66] Praca Zbiorowa, PATIO czasopismo urbanistyczne, nr. 4/2013, Czerwiec 2013.
- [67] Raczyński M., Rodzaje Współczesnej Szklanej Fasady. W poszukiwaniu ciągłości Idei Prostopadłościennej formy. Cześć Piąta. Przestrzeń i Forma 19/2013.
- [68] Rębielak J., Budynek o zespolonej formie systemu konstrukcyjnego. Czasopismo Techniczne 2-A/2/2011.
- [69] Rębielak J., Koncepcja systemu konstrukcyjnego budynku wysokiego. Inżynieria i Budownictwo nr. 1/2012.
- [70] Rębielak J. Metody numeryczne w modelowaniu struktur przestrzennych. Kształtowanie systemów konstrukcyjnych budynków wysokich. Archivolta 1/2013, s. 50-57.
- [71] Rębielak J., Model numeryczny Geodome Sky Tower, Mechanik nr.7 s.604/CD s. 835,2012).
- [72] Rębielak J. New forms of combined structural system proposed for tall buildings, IABSE Conference. IABSE Conference. May 7-9, 2012.
- [73] Rychter Z., Wpływ kształtu wieżowców na jakość konstrukcji., Architecturae et Artibus – 2/2013.
- [74] Rychter Z., Wpływ formy przekroju poprzecznego wieżowców na efektywność ich konstrukcji. Architecturae et ARTIBUS – 4/2014.

- [75] Rydzewska-Szpak A., Transformacja Obszarów Śródmiejskich – wieżowiec (proekologiczny) jako nadbudowa w istniejącej tkance. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Architektura z.51 nr. kol. 1856.
- [76] Sarkisian M., Designing Tall Buildings. Structure as Architecture. Routledge Taylor&Francis Group. 2012.
- [77] Setkowicz P., Budynki wysokie w Krakowie – Debata bez pointy. Czasopismo Techniczne, 3-A/2010.
- [78] Setkowicz P., Budynki ekstremalnie wysokie – szaleństwo czy przyszłość miasta?. Czasopismo Techniczne, 1-A/2/2012.
- [79] Sieczkowski J., Projektowanie Budynków Wysokich z Betonu., Arkady Warszawa 1976.
- [80] Sieczkowski J., Nejman T., Ustroje Budowlane. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej., Warszawa 2002.
- [81] Siwik D., Miedziałowski C. Głębokie posadowienie budynków i metody ich analizy statycznej. Civil and Environmental Engineering 3(2012).
- [82] Skura M., Chrobot T.: Czy sięgnie nieba?. Inżynieria i Budownictwo, nr 12, 2008.
- [83] Słowiński K., Analiza numeryczna modelu konstrukcji nietypowego budynku wysokiego. Inżynieria i Budownictwo nr.7/2010.
- [84] Sun Hi Choi, Thornton Tomasetti Super Tall Building Design Approach, Marzec 2009r.
- [85] Szołomicki J., Berkowski P., Aqua Tower w Chicago – nieenergetyczny ekologiczny wieżowiec (ikona modernistycznej architektury). Budownictwo i Architektura 15(3) (2016) 107-123.
- [86] Taranath B., Wind and Earthquake Resistant Buildings. Structural Analysis and Design. New York 2005
- [87] Taranath B. Reinforced Concrete Design of Tall Buildings. CRC Press Taylor&Francis Group, 2010.
- [88] Twardowski M., Wieże Mieszkalne. Monografie Politechniki Krakowskiej. Kraków 2017
- [89] Wdowicki J., Wdowicka E., Szczepańska J., Budynek wysoki Kingdom Tower – konstrukcja i fundamenty. Inżynieria i Budownictwo nr. 7/2016.

- [90] Wdowicki J., Wdowicka E., Analiza konstrukcji usztywniających budynki przy wykorzystaniu modeli dyskretnych I modeli ciągłych. Materiały Konferencyjne – V konferencja Naukowo-Techniczna „Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania.
- [91] Wdowicki J., Konstrukcje współczesnych budynków wysokich, Politechnika Poznańska.
- [92] Zalewski W., Zabłocki W. Inspiracje inżynierskie kształtowania budynków wysokich – Strukturalne kształty lekkich wysokich budynków. Symposium „Projektowanie Konceptyjne - Kształtowanie Konstrukcji. Konstrukcje z blach fałdowych. Konstrukcje Ciężnowe”. Rzeszów, maj 2000.
- [93] Zabłocki W., Konstrukcje Wacława Zalewskiego". Warszawa 2015r.
- [94] Zbierska A. „Geneza idei i edukacja na rzecz zrównoważonego rozwoju” Fragmenta Agronomica 2007 ( XXIV) nr. 4(96).
- [95] Żurański J. "Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji". Warszawa, Arkady 1978r.

## 7.1. Spis innych źródeł

### [i] Strony internetowe:

- [i1] <https://www.skyscrapercenter.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i2] <http://www.fosterandpartners.com/projects> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i3] <http://www.hotelartsbarcelona.com/en/Hotel> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i4] <http://www.som.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i5] <http://www.londontown.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i6] <http://www.mssp.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i7] <http://www.scielo.cl> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i8] <http://www.budowle.pl> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i9] <http://empirestate.com.pl> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i10] <http://www.ctbuh.org> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i11] <https://www.123rf.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i12] <https://www.eastlondonhistory.co.uk/london-docklands-canary-wharf> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i13] <https://www.emporis.com> – dostęp grudzień 2018 roku.

- [i14] <https://www.wordpress.com/2011/09/09/analisis-e-investigacion-torre-hancock> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i15] <https://www.emporis.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i16] <http://www.skyscrapercity.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i17] <https://www.wilksoneyre.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i18] <https://www.arcgis.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i19] <https://www.old-chicago.tumblr.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i20] <https://www.kpf.com/projects/shanghai-world-financial-center> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i21] <http://www.lera.com/shanghai-world-financial-center-> dostęp grudzień 2018 roku.
- [i22] <http://www.supertalls.fr/images> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i23] <https://www.slideshare.net> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i24] <https://www.issuu.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i25] <https://www.iba-bv.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i26] [https://www.arup.com/tall\\_buildings](https://www.arup.com/tall_buildings) – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i27] <https://www.skyscrapernews.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i28] <https://www.budowle.pl/najwyzsze-budynki> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i29] <https://www.omrania.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i30] <http://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2624-structural-design-and-construction-of-the-foundation-of-tokyo-sky-tree> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i31] <http://www.italianizzato.blogspot.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i32] <http://www.bryla.pl> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i33] <https://www.explore.chicagocollections.org> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i34] <http://www.globtroter.pl> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i35] <https://www.turyn.pl> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i36] <http://www.london-city-churches.org.uk> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i37] <https://www.infoarchitekta.pl> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i38] <https://www.ctbuh.org/papers> Author: A. Smith – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i39] <https://www.lapatilla.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i40] <https://www.architecture.org> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i41] <http://www.sangimignano.com/en/> – dostęp grudzień 2018 roku.



- [i42] <http://www.constructalia.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i43] <http://www.structurae.net> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i44] <http://www.jeannouvel.com/projets/tour-agbar/> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i45] <https://www.pinterest.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i46] <https://www.alamy.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i47] <https://www.reddit.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i48] <http://www.personal.cityu.edu.hk/~bswmwong> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i49] <https://www.e-architect.co.uk> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i50] <https://www.rmjm.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i51] <http://www.tjeg.com> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i52] <http://www.alhamra.com.kw> – dostęp grudzień 2018 roku.
- [i53] <https://www.kpf.com/projects/lotte-world-tower> – dostęp grudzień 2018 roku.

#### **[n] Normy branżowe i rozporządzenia:**

- [n1] Prawo Budowlane
- [n2] Warunki techniczne: *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002r*”.
- [n3] PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1, Oddziaływanie na konstrukcje. Część 1-4 Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.
- [n4] PN-EN 1997-1:2007 Eurokod 7, Projektowanie geotechniczne.

## **8. Aneks**

### **8.1 Krótka analiza wybranych przykładów budynków wysokich opisująca ewolucje form architektonicznych i rozwoju systemów konstrukcyjnych**

Atlas budynków wysokich został przygotowany na wybranych przykładach według autorskiej klasyfikacji, pozwalającej na przedstawienie ciekawych relacji zachodzących pomiędzy formą architektoniczną wieżowca, a strukturalnymi elementami ustroju nośnego. Autor w wyborze reprezentatywnych przykładów, które nie zostały szczegółowo omówione we wcześniejszych rozdziałach niniejszej dysertacji, chciał przedstawić indywidualizm obiektów, które mogą przejść do historii architektury i budownictwa. Zestawienie wyselekcjonowanych przykładów wieżowców może posłużyć do lepszego zrozumienia opisanych i wyjaśnionych uwarunkowań projektowych przedstawionych w dysertacji. Zebrany materiał może być pomocny dla studentów, pracowników dydaktycznych oraz projektantów chcących zrozumieć zachodzące skomplikowane relacje pomiędzy architekturą i konstrukcją budynków wysokich.

Wybrane przez autora reprezentatywne przykłady budynków wysokich uszeregowano w sposób alfabetyczny w odniesieniu do ich nazw własnych, aby ułatwić czytelnikowi łatwe odszukanie danych dotyczących wybranych wieżowców.

## Nr 1. Absolute World Building D

NAZWA OBIEKTU:	Absolute World Building D
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2012 rok
WYSOKOŚĆ:	176 metrów
AUTOR PROJEKTU:	MAD Architects (architektura) Sigmund Soudack & Associates Inc. (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Kanada, Mississauga

### KRÓTKI OPIS BUDYNKU:

Budynek posiada 56 kondygnacji nadziemnych oraz 6 podziemnych. Wieżowiec wykonano w konstrukcji żelbetowej o pionowej osi wewnętrznego trzonu. Forma wieżowca powstała w wyniku wprowadzenia płynnych zmian wymiarów geometrycznych balkonów znajdujących się na każdej kondygnacji.

### DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:



Źródło: [i1, i13, i45]

## Nr 2. Al Hamra Tower

NAZWA OBIEKTU:	Al Hamra Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2011 rok
WYSOKOŚĆ:	413 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Skidmore, Owings & Merrill (SOM)
LOKALIZACJA:	Kuwejt, Kuwejt (miasto)

### KRÓTKI OPIS BUDYNKU:

Budynek posiada 80 kondygnacji nadziemnych oraz 3 podziemne. Cały ustrój nośny, składający się z trzonu oraz zewnętrznej powłoki ścianowej, został wykonany w żelbecie. Trzon wraz z stropami od strony południowej zostały częściowo usunięte.

### DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:



Źródło: [i1, i4, i52]

### Nr 3. Burj Al Arab

NAZWA OBIEKTU:	Burj Al Arab
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	1999 rok
WYSOKOŚĆ:	321 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Atkins (architektura i konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Zjednoczone Emiraty Arabskie, Dubai

#### KRÓTKI OPIS BUDYNKU:



Budynek posiada 56 kondygnacji nadziemnych i 3 podziemne. Główny ustrój nośny budynku to konstrukcja trzonowo-szkieletowa wraz z elewacyjnymi wzmocnieniami w postaci skratowań. Jest to jedyny obiekt z elewacją w postaci membrany teflonowej mocowanej do konstrukcji stalowej.

#### DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:



Źródło: [i1]

#### Nr 4. Burj Khalifa

NAZWA OBIEKTU:	Burj Khalifa
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2010 rok
WYSOKOŚĆ:	828 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Skidmore, Owings & Merrill (SOM) (architektura i konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Zjednoczone Emiraty Arabskie, Dubai
<b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b> Budynek posiada 163 kondygnacje nadziemne i 1 podziemną. Ustrój nośny składa się z centralnie umieszczonego trzonu oraz 3 ramion ustroju ścianowo-szkieletowego. Do wysokości 601 metrów został wykonany w konstrukcji żelbetowej a powyżej, jako konstrukcja stalowa. Wieżowiec posadowiono na płycie żelbetowej o grubości 3,7 metra wspomaganej palami w liczbie 194 sztuk o długości 45 metrów. Ściany trzonu o zmiennej grubości od 1,3 metra do 0,5 metra. Stropy między kondygnacyjnymi o grubości od 0,2 metra do 0,3 metra przy rozstawie słupów o średnicy 0,6 m lub ścian wynoszących 9 metrów.	
<b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b>	
	
	
Źródło: [i1, i22]	

## Nr 5. Capital City Moscow Tower

NAZWA OBIEKTU:	Capital City Moscow Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2010 rok
WYSOKOŚĆ:	310 metrów oraz 257 metrów.
AUTOR PROJEKTU:	NBBJ (architektura) Arup (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Rosja, Moskwa

### KRÓTKI OPIS BUDYNKU:

Budynek posiada 76 kondygnacji nadziemnych i 6 podziemnych. Konstrukcję obu wież tworzy żelbetowy trzon z regularnie ustawionymi megakolumnami, co umożliwiło zaprojektowanie geometrycznej zmiany poszczególnych segmentów.

### DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:



Źródło: [i1, i13]

## Nr 6. Capital Gate Tower

NAZWA OBIEKTU:	Capital Gate Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2011 rok
WYSOKOŚĆ:	165 metrów
AUTOR PROJEKTU:	RMJM (architektura i konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Zjednoczone Emiraty Arabskie, Abu Dhabi

### KRÓTKI OPIS BUDYNKU:

Budynek posiada 36 kondygnacji nadziemnych oraz 1 kondygnację podziemną. Ustrój nośny tworzy żelbetowy trzon wraz z zewnętrzną powłoką stalową. Pochylenie wieżowca wynosi 18 stopni, co jest swoistym rekordem dla obiektów wieżowych. Budynek posadowiono na płycie fundamentowej wzmocnionej 490 palami o długości od 20 do 30 metrów.

### DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:



Źródło: [i1, i49, i50, i51]



## Nr 7. Cayan Tower

NAZWA OBIEKTU:	Cayan Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2013 rok
WYSOKOŚĆ:	306 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Skidmore, Owings & Merrill (SOM) (architektura i konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Zjednoczone Emiraty Arabskie, Dubaj
<b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>	
<p>Budynek jest przykładem zastosowania ramowej konstrukcji dwupowłokowej. Forma wieżowca powstała w wyniku obrotu względem osi centralnej wszystkich kondygnacji w każdym kroku o wartość 1,2 stopnia. Elementy nośne wieżowca wykonano z żelbetu. Ciekawym rozwiązaniem jest centralny trzon biegnący pionowo przez całą wysokość obiektu, którego kształt w formie koła nie nawiązuje do zewnętrznego kształtu budynku. Ciekawym rozwiązaniem konstrukcyjnym są słupy zewnętrznej powłoki, które nie są pochylone, poza narożnikowymi, a ustawione pionowo z przesunięciem mimośrodowym pomiędzy kondygnacjami.</p>	
<b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b>	
Źródło: [i1, i4, i13, i45]	

## Nr 8. Chelsea Tower

NAZWA OBIEKTU:	Chelsea Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2005 rok
WYSOKOŚĆ:	250 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Atkins
LOKALIZACJA:	Zjednoczone Emiraty Arabskie, Dubai

### KRÓTKI OPIS BUDYNKU:

Budynek o 49 kondygnacjach nadziemnych został wykonany w konstrukcji żelbetowej. Znajdująca się powyżej rama wraz z iglicą została wykonana ze stali. Ustrój nośny to przykład rozwiązania trzonowo-szkieletowego.

### DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:



Źródło: [i1, i13]

## Nr 9. China Zun

NAZWA OBIEKTU:	China Zun
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2018 rok
WYSOKOŚĆ:	528 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Kohn Pedersen Fox Associates (architektura) Arup (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Chiny, Pekin

### KRÓTKI OPIS BUDYNKU:

Budynek posiada 109 kondygnacji nadziemnych oraz 8 podziemnych. Główna konstrukcja nośna reprezentowana przez trzon wewnętrzny oraz megakolumny została wykonana w konstrukcji żelbetowej. Powłoka żelbetowa zewnętrzna została skratowana na całej wysokości wieżowca, aby zwiększyć sztywność budynku. Ściany trzonu mają grubość od 120 centymetrów w poziomie parteru do 40 centymetrów na górze budynku. Stropy między kondygnacyjne zostały wykonane na belkach stalowych. Wieżowiec posiada certyfikat LEED Gold.

### DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:



Źródło: [i1, i26]

## Nr 10. Evolution Tower

NAZWA OBIEKTU:	Evolution Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2015 rok
WYSOKOŚĆ:	246 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Gorproject, RMJM (architektura) GK-Techstroy (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Rosja, Moskwa
<b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>	
<p>Budynek posiada 55 kondygnacji nadziemnych oraz 3 podziemne. Budynek wykonano w konstrukcji żelbetowej. Centralnie zaprojektowany trzon posiada kształt zbliżony do koła i współpracuje z ośmioma megakolumnami. Każda kondygnacja jest obrócona o 3 stopnie względem poprzedniej.</p>	
<b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b>	
	
Źródło: [i1, i13, i45]	

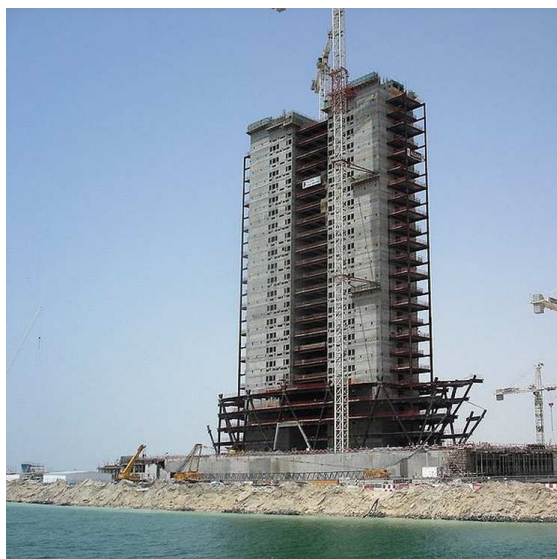
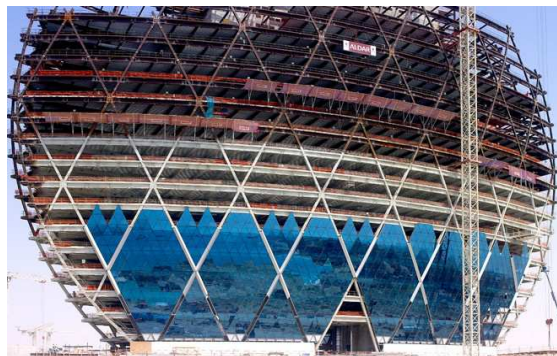
## Nr 11. HQ Aldar Building

NAZWA OBIEKTU:	HQ Aldar Building
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2010 rok
WYSOKOŚĆ:	110 metrów
AUTOR PROJEKTU:	MZ Architects (architektura) Arup (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Zjednoczone Emiraty Arabskie Abu Dhabi

### KRÓTKI OPIS BUDYNKU:

Budynek posiada 25 kondygnacji nadziemnych oraz 3 podziemne. Przyjęty ustrój nośny budynku to przykład współpracy żelbetowych dwóch trzonów oraz zewnętrznej stalowej powłoki ramowej. Stropy między kondygnacyjne wykonano na belkach stalowych. Wypukłą formę wieżowca uzyskano poprzez łamane połączenie kolejnych sekcji szklanych.

### DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:



Źródło: [i1, i13, i26]

Nr 12. International Commerce Center (ICC)

NAZWA OBIEKTU:	International Commerce Center (ICC)
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2010 rok
WYSOKOŚĆ:	484 metry
AUTOR PROJEKTU:	Kohn Pedersen Fox Associates (architektura) Arup (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Chiny, Hongkong

**KRÓTKI OPIS BUDYNKU:**

Budynek posiada 108 kondygnacji nadziemnych oraz 4 podziemne. Wieżowiec został zaprojektowany w systemie megakolumn współpracujących z żelbetowym trzonem. Sztywność przestrzenną zapewniają wiązary kratowe pomiędzy słupami a trzonem, które umiejscowiono na kilku poziomach budynku.

**DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:**



Źródło: [i1, i48]

### Nr 13. Jin Mao Tower

NAZWA OBIEKTU:	Jin Mao Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	1999 rok
WYSOKOŚĆ:	421 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Skidmore, Owings & Merrill (SOM) (architektura i konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Chiny, Shanghaj
<b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>	
<p>Wieżowiec jest reprezentatywnym przykładem budynku o systemie konstrukcji megakolumn oraz wpływu kultury wschodu na formę architektoniczną. Rzut budynku podporządkowany jest symetrycznie ustawionemu trzonowi wewnętrznemu oraz 8 megakolumn o wymiarze przekroju poprzecznego 150 x 500 centymetrów. Ściany trzonu mają grubość od 45 do 85 centymetrów. Budynek posadowiono na palach zwieńczonych płytą żelbetową o grubości 4 metrów. Obiekt wykonano przy zastosowaniu elementów kompozytowych.</p>	
<b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b>	
	
Źródło: [i1, i4, i13, i45]	

Nr 14. Kingdom Center

NAZWA OBIEKTU:	Kingdom Center
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2002 rok
WYSOKOŚĆ:	302 metry
AUTOR PROJEKTU:	Ellerbe Becket, Omrania & Associates (architektura) Arup (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Arabia Saudyjska, Rjad

**KRÓTKI OPIS BUDYNKU:**

Budynek o 41 kondygnacjach nadziemnych posiada 2 podziemne. Wieżowiec zaprojektowano w konstrukcji dwupowłokowej do poziomu dolnej krawędzi otworu jest wykonany w żelbecie. Zewnętrzne ramiona zostały zaprojektowane przy zastosowaniu przestrzennej kratownicy.

**DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:**



Źródło: [i1, i29]



Nr 15. KK100

NAZWA OBIEKTU:	KK100
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2011 rok
WYSOKOŚĆ:	442 metry
AUTOR PROJEKTU:	TFP Farrells (architektura) Arup (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Chiny, Shenzhen
<p><b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>                  Budynek posiada 100 kondygnacji nadziemnych oraz 4 podziemne. Wieżowiec o konstrukcji żelbetowo-stalowej. W celu zwiększenia bardzo smukłej bryły zaprojektowano skratowania wzdłuż całej wysokości budynku. Wierzchołek posiada kształt opływowy zmniejszając tym samym wpływ niekorzystnych oddziaływań zewnętrznych.</p>	
<p><b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b></p> 	
<p>Źródło: [i1, i13]</p>	

Nr 16. La Grande Arche

NAZWA OBIEKTU:	La Grande Arche
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	1989 rok
WYSOKOŚĆ:	111 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Johann Otto von Spreckelsen (architektura) Coyne et Bellier (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Francja, Paryż

**KRÓTKI OPIS BUDYNKU:**

Budynek jest ciekawym przykładem europejskiego obiektu wysokiego. Wysokość budynku wynosi 111 metrów a jego główna konstrukcja została wykonana w żelbecie. Głównym elementem nośnym są dźwigary sprężone o długości 111 metrów i wysokości konstrukcyjnej równej 9,5 metra. Pięciokondygnacyjny pomost został oparty na pionowych fragmentach budynku wykonanych z kolumnach żelbetowych.

**DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:**



Źródło: [i1, i13, i45, i47]

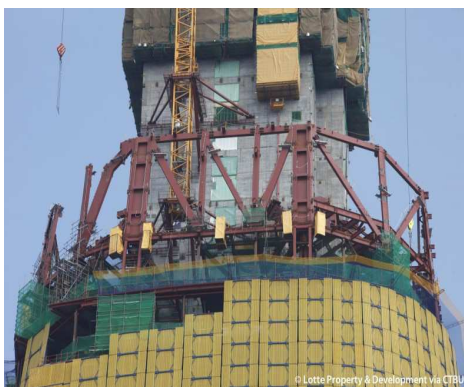
Nr 17. Lotte World Tower

NAZWA OBIEKTU:	Lotte World Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2017 rok
WYSOKOŚĆ:	556 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Kohn Pedersen Fox Associates (architektura) Leslie E. Robertson Associates (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Korea Południowa, Seul

**KRÓTKI OPIS BUDYNKU:**

Budynek posiada 123 kondygnacje nadziemne i 6 podziemnych. Wieżowiec posiada certyfikat LEED Gold. Jest przykładem ustroju nośnego określanego mianem megakolumn. Stateczność zapewnia żelbetowy trzon umiejscowiony centralnie. Fundament budynku składa się z płyty żelbetowej oraz pali o maksymalnej długości wynoszącej około 70 metrów. Koszt budowy wieżowca wyniósł 2,5 mld USD. Forma architektoniczna wieżowca była inspirowana tradycyjną sztuką koreańską, ceramiką oraz kaligrafią. Konstrukcja nośna została zaprojektowana aby wytrzymać trzęsienie ziemi o sile 9 stopni w skali Richtera.

**DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:**



Źródło: [i1, i53]

## Nr 18. Makkah Royal Clock Tower

NAZWA OBIEKTU:	Makkah Royal Clock Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2012 rok
WYSOKOŚĆ:	601 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Dar al-Handasah Shair & Partners (architektura i konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Arabia Saudyjska, Mekka
<p><b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>          Budynek posiada 120 kondygnacji nadziemnych oraz 3 podziemne. Wieżowiec o konstrukcji żelbetowo-stalowej został zaprojektowany w pobliżu największego meczetu i świętego miejsca muzułmanów – Masjid al-Haram.</p>	
<p><b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b></p>       	
<p>Zródło: [i1, i13, i45]</p>	

## Nr 19. Millennium Tower

NAZWA OBIEKTU:	Millennium Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2006 rok
WYSOKOŚĆ:	285 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Atkins (architektura) e.Construct (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Zjednoczone Emiraty Arabskie, Dubai
<b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>	
<p>Budynek posiada 59 kondygnacji nadziemnych oraz 1 podziemną. Wieżowiec zaprojektowano w konstrukcji żelbetowej, gdzie trzonu wewnętrzny współpracuje ze szkieletem znajdującym się w linii obrysu budynku. W linii krótszego boku zaprojektowano tarcze żelbetowe o grubości 120 centymetrów aby ograniczyć wychylenia poziome obiektu. Na dłuższym boku zaprojektowano skratowania elewacyjne zwiększające sztywność budynku. Wysunięta powyżej dachu iglica wraz z ścianą została wykonana w konstrukcji stalowej.</p>	
<b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b>	
 	
Źródło: [i1, i13, i45]	

## Nr 20. New York Times Tower

NAZWA OBIEKTU:	New York Times Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2007 rok
WYSOKOŚĆ:	319 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Renzo Piano (architektura) Thornton Tomasetti (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Stany Zjednoczone, Nowy Jork

### KRÓTKI OPIS BUDYNKU:

Budynek posiada 52 kondygnacje nadziemne. Konstrukcja budynku wykonana w całości ze stali. Stalowa powłoka ramowa została wzmocniona poprzez zaprojektowane skratowań w linii elewacji oraz dodanie outriggerów na dwóch poziomach.

### DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:



Źródło: [i1, i13, i45]

Nr 21. One World Trade Center

NAZWA OBIEKTU:	One World Trade Center
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2014 rok
WYSOKOŚĆ:	546 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Skidmore, Owings & Merrill (SOM) (architektura) WSP Group; Schlaich Bergermann und Partner (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Stany Zjednoczone, Nowy Jork
<p><b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>          Budynek o 94 kondygnacjach nadziemnych i 5 podziemnych został zaprojektowany przy zastosowaniu żelbetowego trzonu wewnętrznego i zewnętrznej powłoki ramowej. Stropy między kondygnacyjne wykonano na belkach stalowych. Sztywność budynku zapewniają kratownice, które łączą trzon z zewnętrzną powłoką na kilku poziomach. W wieżowcu zastosowano wiele rozwiązań pro-ekologicznych oraz nowatorskich technologii.</p>	
<p><b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b></p> 	
<p>Źródło: [i1, i13, i45]</p>	

Nr 22. Petronas Twin Tower 1 i 2

NAZWA OBIEKTU:	Petronas Twin Tower 1 i 2
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	1998 rok
WYSOKOŚĆ:	452 metry
AUTOR PROJEKTU:	Cesar Pelli (architektura) Thornton Tomasetti (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Malezja, Kuala Lumpur
<b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>	
<p>Budynek posiada 88 kondygnacji nadziemnych i 5 podziemnych. Architektura budynku jest przykładem odniesienia do kultury wschodu oraz tradycyjnych motywów dekoracyjnych sztuki islamu, jakim jest ośmioramienna gwiazda. Konstrukcja budynku to zmodyfikowany układ dwupowłokowy. Wewnętrzny trzon budynku oraz 16 słupów o średnicy 2,5 metra zostały wykonane w konstrukcji żelbetowej. Fundament budynku tworzy płyta żelbetowa grubości 4,5 metra, która jest ocepem dla 104 pali o zmiennej długości.</p>	
<b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b>	
Źródło: [i1, i13, i45, i46]	



Nr 23. Shimao International Plaza

NAZWA OBIEKTU:	Shimao International Plaza
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2006 rok
WYSOKOŚĆ:	333 metry
AUTOR PROJEKTU:	Ingenhoven Overdiek Und Partners East China Architectural Design (architektura i konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Chiny, Shanghaj
<p><b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>          Budynek posiada 60 kondygnacji nadziemnych oraz 3 podziemne. Wieżowiec został skonstruowany przy zastosowaniu żelbetowego trzonu i megakolumn. Rzut budynku w podstawie ma kształt trójkąta. Na szczycie budynku zamontowano stalowe iglice. Posadowienie budynku stanowi zespolona płyta żelbetowa z szeregiem pali.</p> <p><b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b></p> 	
<p>Źródło: [i1, i16, i45]</p>	

Nr 24. The Broadgate Tower

NAZWA OBIEKTU:	The Broadgate Tower
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2008 rok
WYSOKOŚĆ:	162 metry
AUTOR PROJEKTU:	Skidmore, Owings & Merrill (SOM) (architektura i konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Wielka Brytania, Londyn
<p><b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>                  Budynek posiada 35 kondygnacji nadziemnych oraz 1 podziemną. Wieżowiec jest przykładem zastosowania stali na cały ustrój nośny budynku. Podyktowane to było obecnością w najbliższym sąsiedztwie budynku stacji kolejowej. Forma architektoniczna została zaakcentowana poprzez skratowane ramy stalowe widoczne na całej wysokości szklanych elewacji. Elementy konstrukcyjne znajdujące się na zewnątrz zostały obłożone blachą ze stali nierdzewnej.</p>	
<p><b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b></p> 	
<p>Źródło: [i1, i4]</p>	

## Nr 25. The Leadenhall Building

NAZWA OBIEKTU:	The Leadenhall Building
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2014 rok
WYSOKOŚĆ:	224 metry
AUTOR PROJEKTU:	Rogers Strik Harbour (architektura) Arup (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Wielka Brytania, Londyn
<p><b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>          Budynek posiada 52 kondygnacje nadziemne i 4 podziemne. Wieżowiec jest reprezentatywnym przykładem zmodyfikowanego stalowego ustroju dwupowłokowego określanego mianem „rura w rurze”. Strukturalna determinanta formy architektonicznej szczególnie widoczna jest w ustrojach nośnych powłokowych, tak jak jest w tym przypadku. Od strony północnej znajduje się samonośny rdzeń w którym zlokalizowano windy osobowe.</p>	
<p><b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b></p>  <p>© Daniel Harrison via CTBUH          © Daniel Taylor via CTBUH          © Richard Bryant-British Land Oxford Properties via CTBUH          © Terrill Meyer Boake via CTBUH          © Phil Oldfield via CTBUH          © Tamoor Muftic via CTBUH</p>	
<p>Źródło: [11]</p>	

Nr 26. The Shard

NAZWA OBIEKTU:	The Shard
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2013 rok
WYSOKOŚĆ:	306 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Renzo Piano Building Workshop (architektura) WSP Group (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Wielka Brytania, Londyn

**KRÓTKI OPIS BUDYNKU:**

Forma budynku nawiązuje do ostrosłupa, wraz ze wzrostem wysokości zmniejsza się powierzchnia wewnętrzna budynku. Układ konstrukcyjny to rozwiązanie trzonowo-szkieletowe. Budynek posiada 73 kondygnacje nadziemne i 3 podziemne. Do 39 kondygnacji zewnętrzny szkielet wykonano ze stali, następnie zaprojektowano konstrukcje żelbetową. Najwyższą część budynku ponownie wykonano ze stali. Przyjęte rozwiązanie ma ograniczyć maksymalne wychylenia poziome. Wewnętrzny trzon żelbetowy biegnie pionowo przez całą wysokość obiektu. Wieżowiec posadowiono na palach żelbetowych o długości do 50 metrów i średnicy około 1,8 metra.

**DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:**



Zródło: [i1, i27, i45]

Nr 27. Torre Glories (Torre Agbar)

NAZWA OBIEKTU:	Torre Glories (Torre Agbar)
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2004 rok
WYSOKOŚĆ:	144 metry
AUTOR PROJEKTU:	Jean Nouvel (architektura) BAC Engineering Consultancy Group (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Hiszpania, Barcelona

**KRÓTKI OPIS BUDYNKU:**

Budynek o funkcji biurowej posiada 35 kondygnacji nadziemnych oraz 4 podziemne. Główna konstrukcja składająca się z wewnętrznego trzonu, ramowej powłoki zewnętrznej oraz stropów między kondygnacyjnych została wykonana w konstrukcji żelbetowej kompozytowej. Wewnętrzny trzon umiejscowiono niesymetrycznie względem rzutu budynku. Ze względu na zawężającą się formę wierzchołka ostatnie stropy oparto na wspornikowych belkach stalowych. Cechy ikoniczności obiektu wynikają głównie z jego formy i kształtu całej bryły. Optywowy kształt ma korzystne parametry aerodynamiczne. Układ konstrukcyjny budynku reprezentowany przez zewnętrzny żelbetowy szkielet tworzący sztywną powłokę, umożliwił zaprojektowanie interesującej formy architektonicznej budynku.

**DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:**



Źródło: [i1, i13, i44, i45]

Nr 28. World Trade Center (WTC)

NAZWA OBIEKTU:	World Trade Center (WTC) – One i Two.
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	1972 rok i 1973 rok
WYSOKOŚĆ:	417 metrów i 415 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Minoru Yamasaki, Yeoh Ming Pei (architektura) Leslie Robertson (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Stany Zjednoczone, Nowy Jork
<p><b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>                  Budynki zostały zniszczone w wyniku ataku terrorystycznego w 2001 roku. Były reprezentatywnymi przykładami wieżowców o konstrukcji powłokowej ramowej wykonanej ze stali. Budynki były zaprojektowane w formie prostodałściennej o wymiarze rzutu poziomego przypominającego kwadrat wynoszącym 63,5 metra. Słupy stalowe o wymiarze 45 x 45 centymetrów zostały rozstawione co około 1 m. Niezapomnianą sylwetkę zawdzięczały indywidualnej formie wieżowca zaakcentowanej gęstym podziałem słupów stalowej powłoki ramowej.</p>	
<p><b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b></p> 	
<p>Źródło: [i1, i13, i45]</p>	

Nr 29. 20 Fenchurch Street

NAZWA OBIEKTU:	20 Fenchurch Street
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2014 rok
WYSOKOŚĆ:	160 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Rafael Vinoly Architects (architektura) Halcrow Yolles (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Wielka Brytania, Londyn
<p><b>KRÓTKI OPIS BUDYNKU:</b>                  Budynek posiada 36 kondygnacji nadziemnych oraz 2 podziemne. Wieżowiec o konstrukcji trzonowo-ramowej, której główne elementy nośne wykonano jako żelbetowe. W projektowaniu fasady budynku popełniono błędy związanych z doбором kąta załamania elewacji, co doprowadziło do negatywnego oddziaływania na otoczenie.</p>	
<p><b>DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:</b></p>  <p>Zródło: [i1, i13, i45]</p>	

Nr 30. 432 Park Avenue

NAZWA OBIEKTU:	432 Park Avenue
DATA UKOŃCZENIA BUDOWY:	2015 rok
WYSOKOŚĆ:	426 metrów
AUTOR PROJEKTU:	Rafael Vinoly Architects (architektura) WSP Cantor Seinuk (konstrukcja)
LOKALIZACJA:	Stany Zjednoczone, Nowy Jork

**KRÓTKI OPIS BUDYNKU:**

Budynek posiada 85 kondygnacji nadziemnych oraz 3 podziemne. Wieżowiec posiada żelbetową konstrukcję dwupowłokową. Rzut poziomy budynku zbliżony jest do kwadratu o wymiarach około 28,5 metra x 28,5 metra. Wewnętrzny trzon budynku o szerokości ponad 9 metrów w którym znajdują się windy oraz klatka schodowa został wykonany z ścian żelbetowych o grubości od ponad 70 centymetrów do 30 centymetrów na górze wieżowca. Obiekt wyposażono w dwa absorbenty częściowo ograniczające maksymalne wychylenia.

**DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA:**



Źródło: [i1, i13]