SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

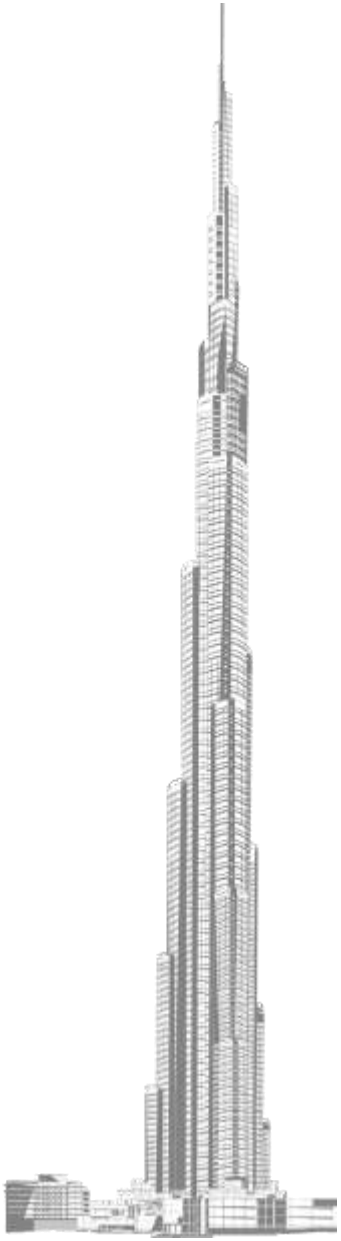
Predavanje 1

Zagreb 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za konstrukcije

Visoke građevine



doc.dr.sc. Anđelko Vlašić, dipl.ing.građ.
doc.dr.sc. Goran Puž, dipl.ing.građ.

IZVEDBENI PLAN PREDAVANJA I KOLOKVIJA		
Datum	**R.br.**	**Predavanje**
04.10.2017.	**I.**	Povijesni pregled i primjeri izvedenih izuzetnih visokih građevina
11.10.2017.	**II.**	Osobitosti projektiranja i projektni kriteriji
18.10.2017.	**III.**	Konstrukcijski sustavi - općenito
25.10.2017.	**IV.**	Vertikalna djelovanja, požar i vjetar
08.11.2017.	**V.**	Potresno djelovanje
15.11.2017.	**VI.**	Okvirne konstrukcije (krute i sa spregovima)
22.11.2017.	**VII.**	Posmični zidovi
27.11.2017.		**I. KOLOKVIJ** (u terminu vježbi) (predavanja 1.-6.)
29.11.2017.	**VIII.**	Cijevne strukture
06.12.2017.	**IX.**	Outrigger sustavi
13.12.2017.	**X.**	Hibridni sustavi
20.12.2017.	**XI.**	Međukatne konstrukcije
10.01.2018.	**XII.**	Numeričko modeliranje – priprema i osobitosti
17.01.2018.	**XIII.**	Oprema visokih građevina
24.01.2018.		**II. KOLOKVIJ** (u terminu predavanja) (predavanja 7.-13.)
		POPRAVNI KOLOKVIJ (u terminu prvog ispitnog roka)

Predavanje 1:

1. Uvod: plan predavanja
2. Teme i cilj predavanja
3. Definicije
4. Povijest
5. Arhitektura
6. Primjeri građevina

Razlozi za gradnju iznimno visokih zgrada

- Suvremeni neboderi grade se zbog cijene zemljišta i naglog rasta gradova, ali najviše zbog prestiža
- povijesne visoke građevine: vjerska namjena
- danas: poslovna ili stambena namjena
- poslovne zgrade: odgovor na potrebu poslovnih aktivnosti da budu blizu, u središtu važnog grada - simboli moći korporacija
- hoteli: na lokacijama koncentrirane aktivnosti
- stambene zgrade: na lokacijama gdje postoji potreba za stanovima a mogućnosti širenja grada su ograničene (Hong Kong, Rio de Janeiro)

Council on Tall Buildings and Urban Habitat

Neprofitna udruga koja se bavi visokim građevinama, vrelo podataka i relevantan izvor informacija o npr. visinama zgrada.

Nagrada CTBUH 2016, najuspješnija visoka građevina: One Central Park, Sydney, Australia

Visoke građevine: teme i cilj

- neboderi kao posebne konstrukcije: sustavi, opterećenja, modeliranje, detalji
- neboderi kao utilitarne građevine: investicijski projekt, namjena, arhitektura, konstrukcija, oprema, vođenje projekta, održavanje, sigurnost, održivost
- najizazovnije građevine današnjice sastoje se od osnovnih elemenata o kojima smo učili u drugim predmetima
- ekstremna naprezanja, značajne deformacije, posebne tehnike izvedbe, fizika
- objedinjavanje znanja iz različitih grana građevine

Definicije:

- bavimo se samo zgradama namijenjenim za rad ili stanovanje
- neboder: visoka zgrada, namijenjena radu ili stanovanju, s mnogo katova
- građevinski: visoka građevina je ona na čije projektiranje, zbog njezine visine, horizontalna djelovanja od vjetra i potresa imaju presudan utjecaj
- arhitektonski: svaka zgrada koja se visinom izdvaja iz svoje okoline i utječe na sliku grada može biti nazvana neboderom

Visoke građevine kroz povijest

• ***Stari Rim:***

- drvene stambene četverokatnice, konstrukcije sa stupovima i gredama do požara 64. g.po.Kr.

- nakon požara: opeka, beton, drvo, bačvasti svod i luk – do 7 (10?) katova
- *insulae*

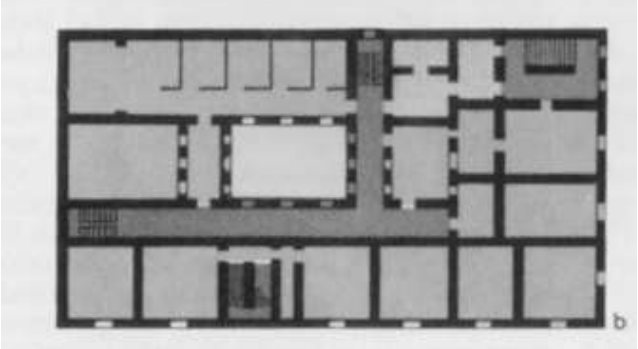
- visinsko ograničenje gradnje:

car August, do 25 m

- gradnja višlja od 5 katova:

nedostatna čvrstoća gradiva

opasnost od požara



Visoke građevine kroz povijest

- ***Srednji vijek: talijanski stambeni tornjevi***

Ograničenje širenja grada van zidina: potreba za stambenim građevinama veće visine

Stambene kule: utočište obitelji, sklonište za imetak i zalihe

Zidni plašt horizontalno podijeljen grednicima ili svodovima

Bologna: stambeni tornjevi, najpoznatiji: 97 m
Firenca: zakonom iz 1251. sve urbane zgrade ograničene na najveću visinu od 26 metara
Manji gradovi sjeverne Italije, srednji vijek: tornjevi od 51 m, San Giminiano

Visoke građevine kroz povijest

- ***16. do 19. stoljeće***
- Zgrade višlje od 6 katova su rijetke: problem vodoopskrbe
- Visoke građevine: vjerska namjena (crkveni tornjevi)
- Grad unutar zidina: Edinburgh, 17 st. do 14 katova
- Grad Shrewsbury, Engleska, 1797.: okvirni sklop od lijevanog željeza

- ***Tornjevi na istoku***

Egipat, 11. st.: zgrade do 14 katova visine – Fustat, Kairo

Jemen: grad Shibam, 16. st. stambeni tornjevi – obrambena svrha

Zgrade od nepečene opeke do visine 11 katova

Visoke građevine kroz povijest

Suvremeni neboderi

kombinacija čelične konstrukcije i klasične gradnje: SAD, kraj 19. stoljeća

New York: za razliku od drugih gradova nema ograničenje visine zgrada

bitni tehnološki preduvjeti za nebodere - isplativost:

- *dizalo (lift, moderna izvedba 1852)*
- *gradiva veće čvrstoće (otpornosti): čelik i beton*
- *konstruktivni sustav: čelični okvir*
- *sustav opskrbe vodom*

Izmjena okolnosti: viši katovi postaju atraktivni korisnicima

Flatiron Building, New York 1901.

Visoke građevine kroz povijest

- prvi neboderi: klasična gradnja, beton i opeka
- lakše skeletne konstrukcije: željezni okvir s opečnom ispunom
- željezni okvir s ovješenom staklenom fasadom: Liverpool 1864.

Liverpool 1866.

Oriel Chambers, Liverpool 1864.

Visoke građevine kroz povijest

- čelični okvir kao glavna konstrukcija: 1889.
- dijagonalni spregovi u vertikalnim rešetkama: 1891.
- kraj 19. st.: arhitekti istražuju forme koje odražavaju nove konstrukcije
- procvat gradnje, ali i problemi: sigurnost korisnika, ograničenja
- čelični okviri: vrhunac u Empire State Building
- armirani beton: 1930-ih zgrada od 23 kata
- zastoj u rekordnim visinama zbog ekonomske depresije
- nakon II svjetskog rata: novi dometi – nove strukture i arhitektura

Visoke građevine kroz povijest

- Equitable Life Insurance Building, New York 1870., 8 katova
- Home Insurance Building, Chicago, 1883., 11 katova
- Park Row Building, New York, 1899., 30 etaža
- Woolworth Building, New York, 1913., 60 katova
- Empire State Building, 1931., 102 kata, 381 m
- World Trade Center, New York, 1973., 110 k, 417 m
- Sears Tower, Chicago, 1974, 109 katova, 442 m
- Taipei 101, Tajvan, 2004, 448 m, 101 kat
- Burj Dubai, Dubai, 2010, 828 m, 162 katova

Woolworth Building 1913.: s visinom 241 m rekord do 1930. Neo-gotička katedrala trgovine

Prvi neboderi u Europi

- razvitak struktura dogodio se u SAD
- Edificio Telefonica, Madrid 1929.
- Boerentoren, Antwerpen, Belgija, 1932.: najviša zgrada u Europi kroz 20 godina, visina 87,5 m

Neboderi u Sovjetskom Savezu

- Staljinovi tornjevi – *vysotke:* osobna želja diktatora da strancima pokaže Moskvu kao velegrad usporediv sa zapadnim metropolama – neboderi?
- sovjetski inženjering: ogromne rezerve sigurnosti u čeličnoj konstrukciji, masivne betonske međukatne konstrukcije – skromne visine

SAD: rekordni neboderi prije ekonomske depresije

- New York 1930.:

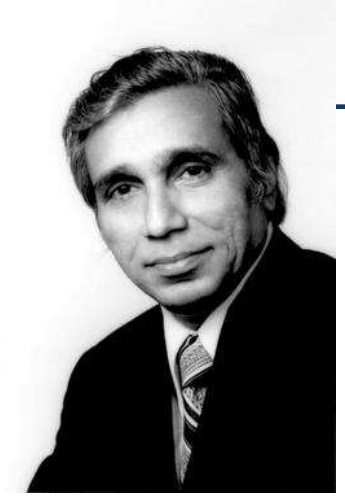
  Chrysler Tower

  Empire State Building

- Natjecanje korporacija u prestižu: General Motors i Chrysler
- prostorni okviri od čeličnih greda
- konstrukcija diktira unutrašnjost: gust raspored stupova
- isplativost ovisi o brzini izgradnje, a ona o organizaciji građenja
- inovacije u prefabrikaciji elemenata i opremi za izgradnju

Izgradnja nebodera 1930.-ih

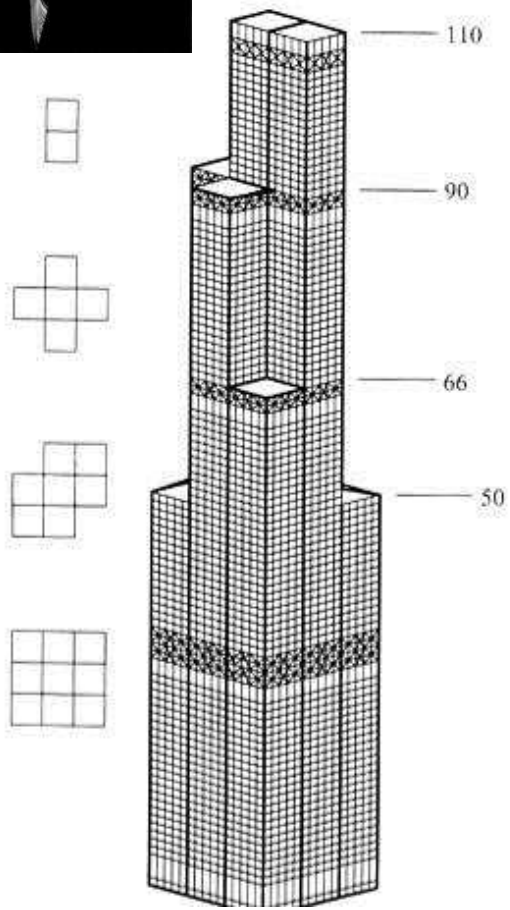
- zahtjev Investitora: Empire State Building mora biti višlji od Chryslerove zgrade i dovršen istovremeno
- pregovori s izvoditeljima: Starrett Bros. and Eken izjavljuju da nemaju opremu za gradnju i da će je projektirati posebno za projekt
- fast-track construction (ubrzana gradnja): početak izvedbe prije dovršenja projektne dokumentacije
- načelo: svi dijelovi moraju biti maksimalno dovršeni pred ugradnju (80 sati od visoke peći do montaže)
- ograničeno gradilište: dostava dijelova točno pred montažu
- rezultat: 4,5 katova tjedno
- i danas: primjer uzorne organizacije



Povijesni razvitak konstrukcija

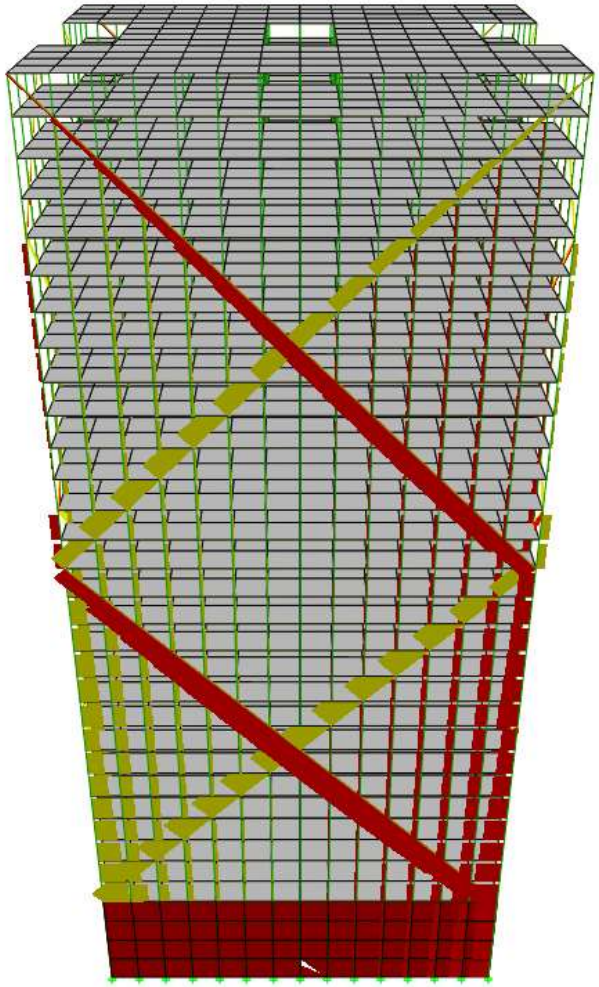
- Fazlur Khan 1960-ih: kruti čelični okvir nije jedini konstrukcijski sklop za visoke zgrade
- razvitak novih sklopova: cijevni sustavi
- prednost: oblikovna i ekonomska efikasnost
- veliki otvoreni prostori u nižim etažama
- Sears Tower 1974. (danas Willis Tower) – prva visoka građevina sustava snopa cijevi
- konstruktori danas - izbor sustava:

Okviri sa spregovima
Okviri s ispunom
Posmični zidovi
Okviri sačinjeni od zidova
Okvirne cijevi
Konstrukcije sa jezgrom
Prostorne konstrukcije
Mješane konstrukcije



Povijesni razvitak konstrukcija

- razvitak kompjutorskih mogućnosti za proračun: oslobađanje kreativnih potencijala projektanta
- razvitak sklopova s miješanim konstrukcijskim sustavom: nije nužno imati jednostavan model
- konstruktor ima realan model cjelovite zgrade umjesto slagalice brojnih stupova i greda
- mogućnost optimalizacije sklopa i pojedinih konstruktivnih elemenata
- prije ere računala: jednostavan sklop kojeg je moguće sagledati i analizirati ograničenim računskim modelom – jasna konstrukcija
- u eri računala: pojava mješovitih sklopova koji nisu uvijek optimalni – računalo daje rezultate, ne usmjerenje prema elegantnom rješenju problema



Povijesni razvitak konstrukcija

- gradovi s najviše nebodera – središte razvitka novih struktura:

  Hong Kong, New York City, Chicago

Povijesni razvitak konstrukcija

Hong Kong: oko 8000 nebodera

Povijesni razvitak konstrukcija

New York City, oko 6000 nebodera

Povijesni razvitak konstrukcija

Shanghai, oko 1000 nebodera

Povijesni razvitak konstrukcija

Različiti izvori navode različite podatke o istim građevinama

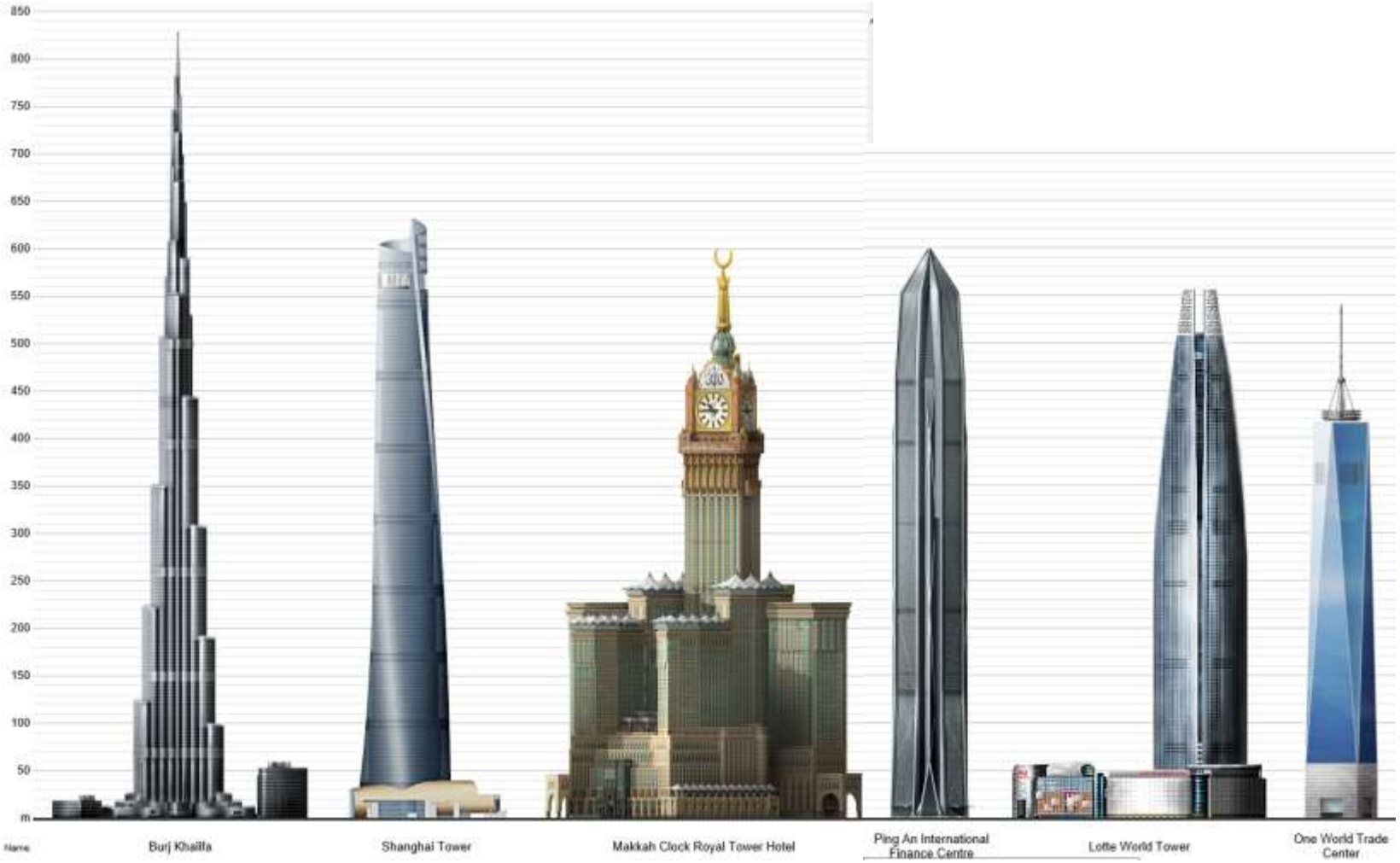
Jedna noviji, veoma visoki neboder

- Shanghai Tower,
- visina 632 metra
- 128 katova
- Kina, grad Lujiazui, Shanghai.
- od 2015, najvišlja građevina mjereno do najvišljeg uporabljivog kata (kat 127, 587.4 m).
- najbrži liftovi: 20.5 m/s (74 km/h).

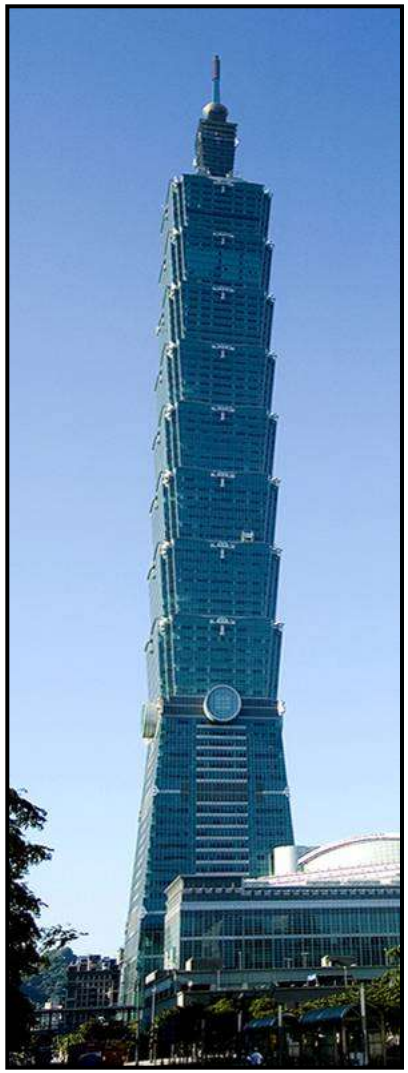
Najvišlja zgrada, apsolutno

- Burj Khalifa, 818 m
- Dubai, Ujedinjeni Emirati,
- dovršen 2010.

Najvišlji neboderi današnjice (www.skyscraperpage.com)



Burj Dubai
818 m



Taipei 101
509 m

Shanghai
World Financial Center
492 m

Hong Kong
International Commerce
Centre - 483 m

Arhitektura visokih zgrada

investitor ⇔ arhitekt ⇔ konstruktor ⇔ projektant opreme

- nametnuta ograničenja sužavaju mogućnost odabira optimalnog nosivog sklopa:

  planiranje unutarnjeg prostora

  odabrani materijali

  metoda građenja i rokovi

  odabir vanjske obloge - fasada

  ograničenja lokacije

  položaj instalacijskih sustava

  veličina horizontalnih opterećenja

  proporcije i visina konstrukcije

  sigurnost

NY: One World Trade center,
108 katova, 541 m (1776 ft)

Arhitektura visokih zgrada

- početak 20. stoljeća: detalji starijih, nižih zgrada kopirani na visoku građevinu (Art Deco)
- veći dio 20 st.: jednostavne geometrijske forme, internacionalni stil (World Trade Center)
- kraj 20. stoljeća: povijesni – historicistički elementi zgrade prilagođeni i reinterpretirani
- arhitekti nastoje u oblik zgrade unijeti obilježja povijesti kraja u kojem se nalazi (pagoda, islamski geometrijski principi, razni simboli...)

Woolworth Building 1913., detalj

Sjedište UN 1950.

Arhitektura

• internacionalni stil: John Hancock Center, Chicago 1969, h=457 m

• historicistički elementi:

Tuntex Sky Tower, Kaoshung,

Tajvan 1997, h=378 m

arhitekt: Kevin Fields

Arhitektura: trendovi

- trend u arhitekturi: kreiranje zgrada nepravilnih oblika
- tlocrtna složenost, visinska promjenjivost
- konstruktor ih neće moći svrstati u pojedini konstrukcijski sustav

1 World Trade Center,

Capital City, Moskva, toranj Moskva, 76 katova, 302 m toranj St. Petersburg, 257 m, dovršeni 2010.

Najviši u Europi do 2012.

Arhitektura: trendovi

Neboderi i razvitak gradova

Perspektiva tranzicijskih zemalja

Varšava
1991. – 2011.

Nova poslovna središta:

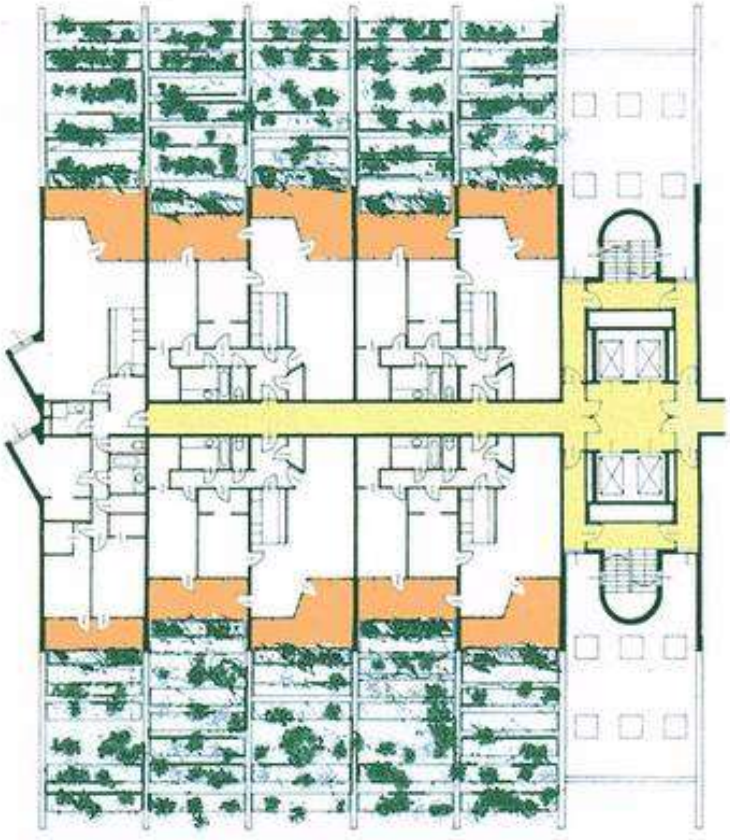
Capital City Moskva

Canary Wharf London

La Defanse, Pariz

Arhitektura: trendovi

- stanovanje u neboderu: poželjno ili ne?
- ekološki i humani neboderi: novi izazovi konstrukterima



Arhitektura: namjena i konstruktivno oblikovanje

- bitna razlika poslovnih i stambenih zgrada
- poslovni prostor:

  korisnik organizira radne prostorije – traži se sloboda u postavljanju pregrada

  potreba za velikim predvorjem, restoranima, konferencijskim dvoranama, etažama sa slobodnim prostorom
- stambeni prostor:

  pojedinačni samostalni stambeni prostori

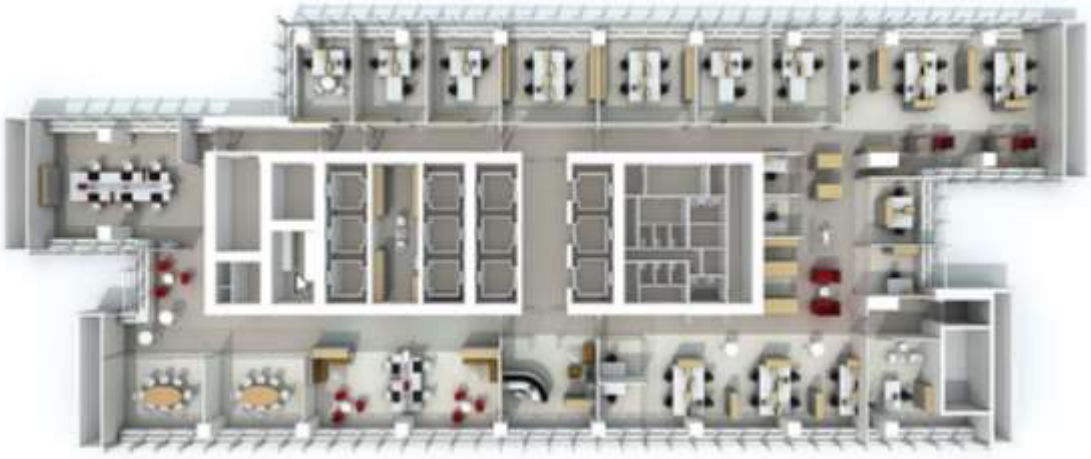
  požarna zaštita i akustičke barijere između stanova

  ponavljanje rastera kroz etaže

- servisne etaže – prostori koji služe za opremu, ne za korisnika

Arhitektura visokih zgrada

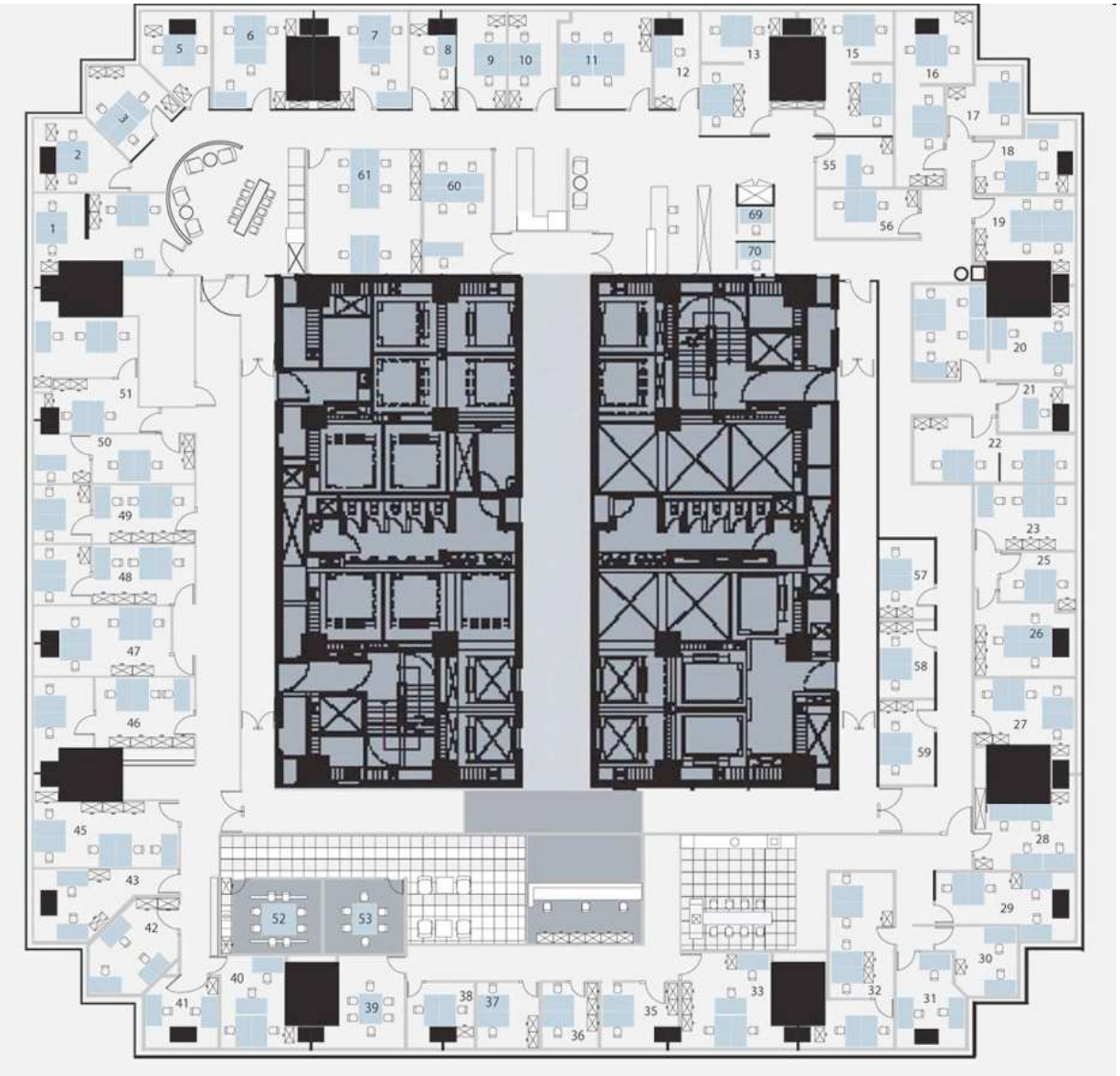
- raspored prostora unutar poslovne zgrade:
  - središnja jezgra, servisni prostor
  - hodnici oko jezgre
  - pojedinačne kancelarije uz fasade uređuje korisnik



Njemačka: Frankfurter Buro Center, 1981., 40 katova

Arhitektura

Tajvan: Taipei 101, 2004., 101 kat



Arhitektura visokih zgrada

- raspored prostora u hotelu ili stambenoj zgradi

  veći zahtjevi na pregrade

  traži se manja fleksibilnost prostora

Stambeni toranj: Seatle, 2010.

posmični zidovi i vanjski stupovi

Arhitektura: namjena i konstruktivno oblikovanje

- razlika poslovnih i stambenih zgrada
- poslovni prostor:
  - instalacije se vode horizontalno - u stropovima
  - tipična visina kata poslovne zgrade 3.5 m ili više
- stambeni prostor:
  - instalacije se vode vertikalno
  - visoke stropne konstrukcije nisu potrebne, eventualno na hodnicima
  - tipična visina kata za stambene i hotelske zgrade iznosi od 2.7 m
- Poslovna i stambena zgrada iste katnosti mogu se visinom razlikovati za 20%

Arhitektura – konstrukcija - financije

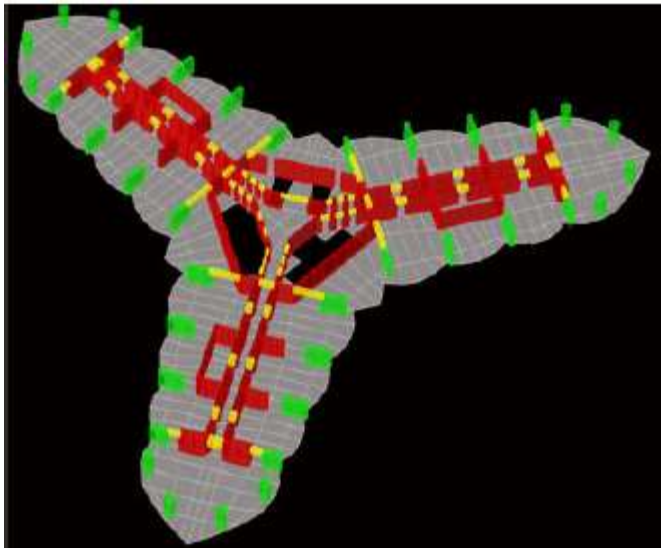
- nedostaci visokih u odnosu na konvencionalne građevine

  viša cjena izgradnje po jedinici površine

  manje korisnog prostora

  viša cijena održavanja

- oblikom i geometrijom konstruktor i arhitekt nastoje opravdati investiciju – što više kvalitetnog prostora za iznajmljivanje
- efikasnost: oblikovanje jezgre i racionalnost konstruktivnih elemenata



Burj Khalifa 2010., tlocrt kata

Jezgra

Posmični zidovi

Obodni stupovi

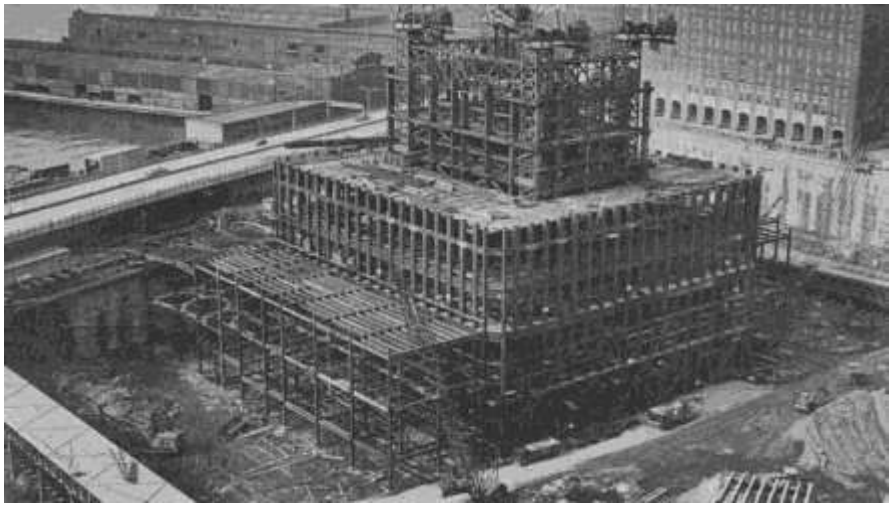
Arhitektura – konstrukcija - financije

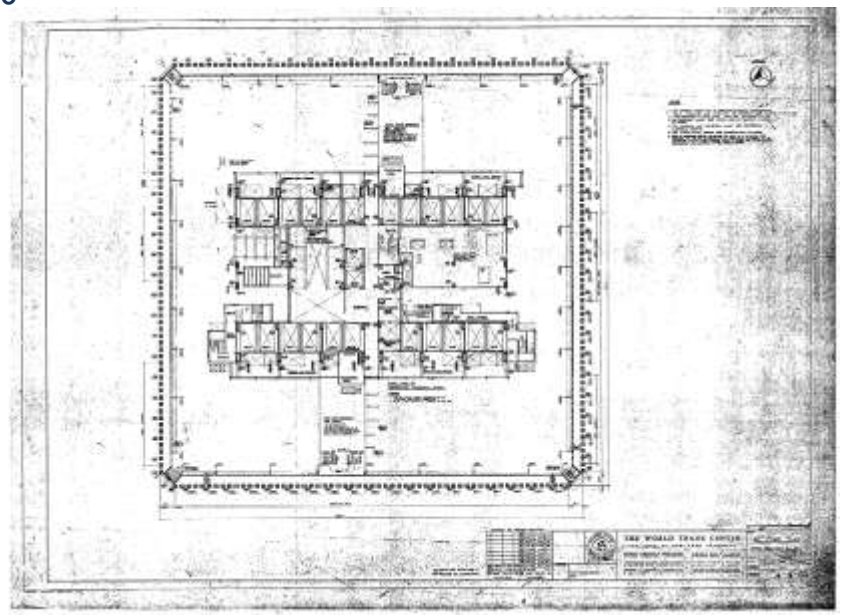
- učinkovitost: omjer netto površine prema ukupnoj površini
- netto površina: prostor za iznajmljivanje
- gubitak: jezgra + nosivi elementi
- učinkovitost znatno ovisi o lokalnim prilikama:

Njemački propisi – ploča do 8 m raspona, učinkovitost do 70%
London: ploča od 11 m raspona daje učinkovitost od 80%
Daleki istok: rasponi do 15 m

Statistika: četverokatnica – učinkovitost 85%
40 i više katova: oko 70%

WTC, NY





Arhitektura – konstrukcija – financije

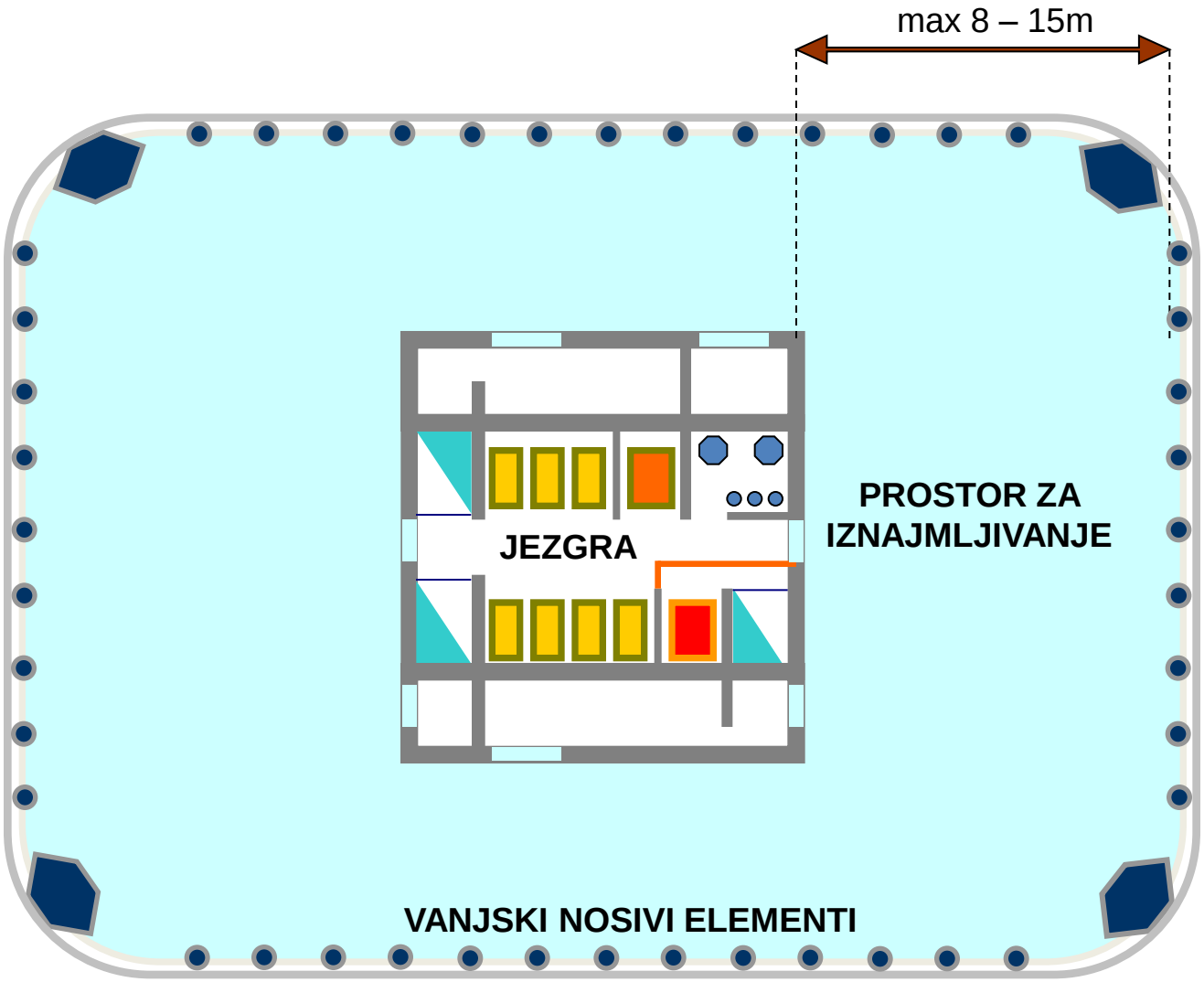
formiranje tlocrta

Jezgra: liftovi, instalacije, stubišta, požarno stubište

Vanjski nosivi elementi

Stropna konstrukcija

Iskoristivi prostor



Arhitektura – konstrukcija – financije

formiranje visinskog rasporeda

Sky lobby: prijelazna etaža,

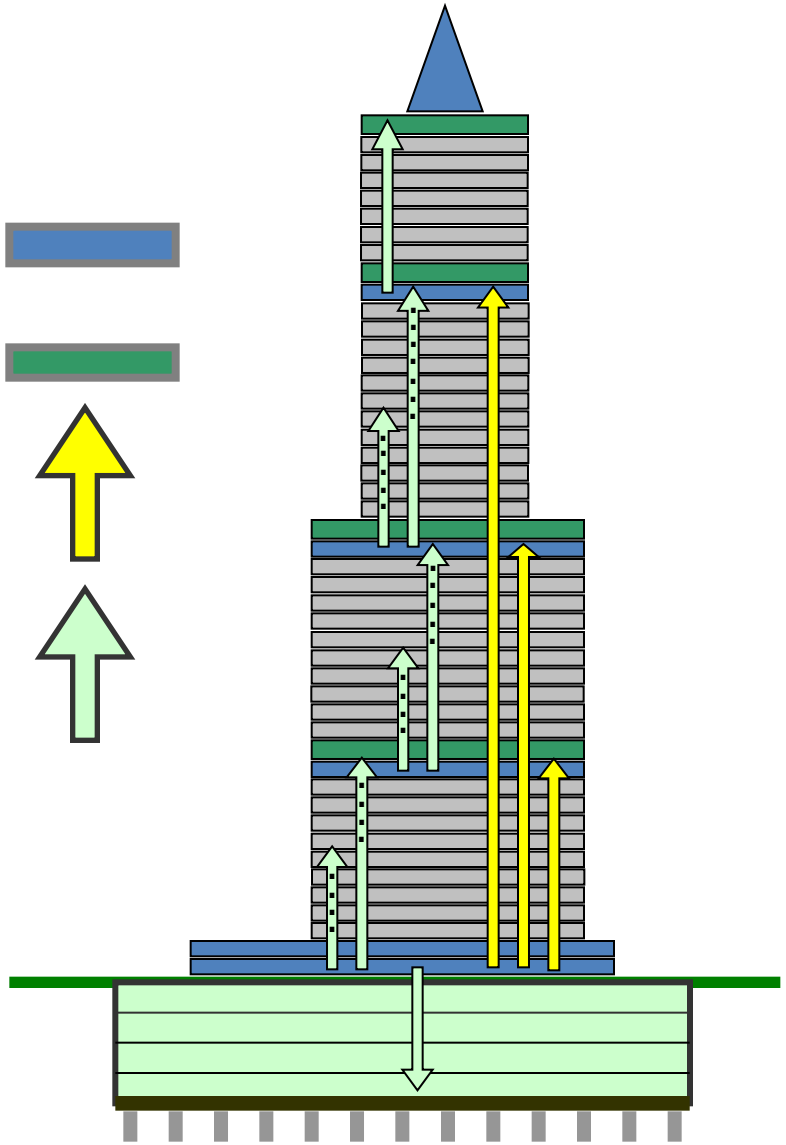
Oprema i instalacije: servisne etaže,

Ekspresni liftovi (do prijelaznih etaža)

Lokalni liftovi – ograničen broj etaža

Servisni liftovi – ograničena uporaba, velika nosivost, sve etaže

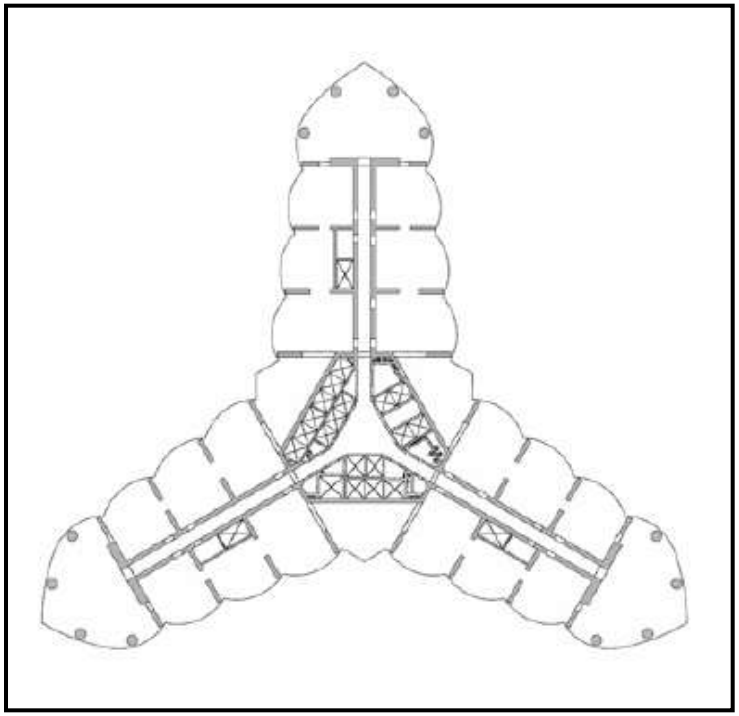
Požarni liftovi – posebna izolacija

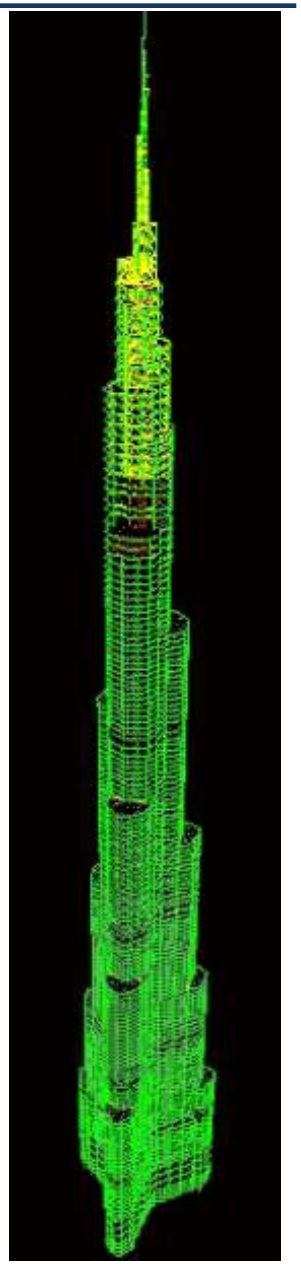


Primjeri izvedenih građevina *Burj Dubai, Ujedinjeni Arapski Emirati*

Arhitektura

- Utjecaj tradicionalne gradnje:
  - šiljasti lukovi
  - kupole oblika luka
  - šiljci (spires)
  - pustinjski cvijet sa središnjom strukturom i laticama
- rezultat: triaksijalna geometrija sa spiralnim smanjenjem s visinom.





Arhitektura

- Toranj je u tlocrtu Y-oblika.

Kako se penje u visinu krila se povlače prema središnjoj jezgri u spiralnom uzorku, koji naglašava visinu, sve dok ne dosegnu središnju jezgru, odakle središnja jezgra prestaje i otkriva jedan šiljak.

- Y-oblik je idealan za stanovanje i hotele sa krilima koja omogućavaju maksimalne poglede na okolinu i istovremeno unutarnje prirodno osvjetljenje, a privatnost je sačuvana.

Arhitektura

Središnja jezgra sadrži sve vertikalne liftove i mehaničke podizače.

- pet neovisnih servisnih područja, razmaknutih za oko 30 katova po visini zgrade.

Iznad nastanjenog betonskog dijela zgrade smješten je čelični šiljak, u kojem se nalaze komunikacije i dodatni servisni katovi.

Arhitektura

Arhitekti i inženjeri su zajedničkim radom razvili oblik i konstrukcijski sustav zgrade, koji učinkovito preuzima dominantno djelovanje vjetra

Konstrukcijski sustav

dominantni utjecaj vjetra na projektiranje

toranj oblikovan tako da smanji sile vjetra

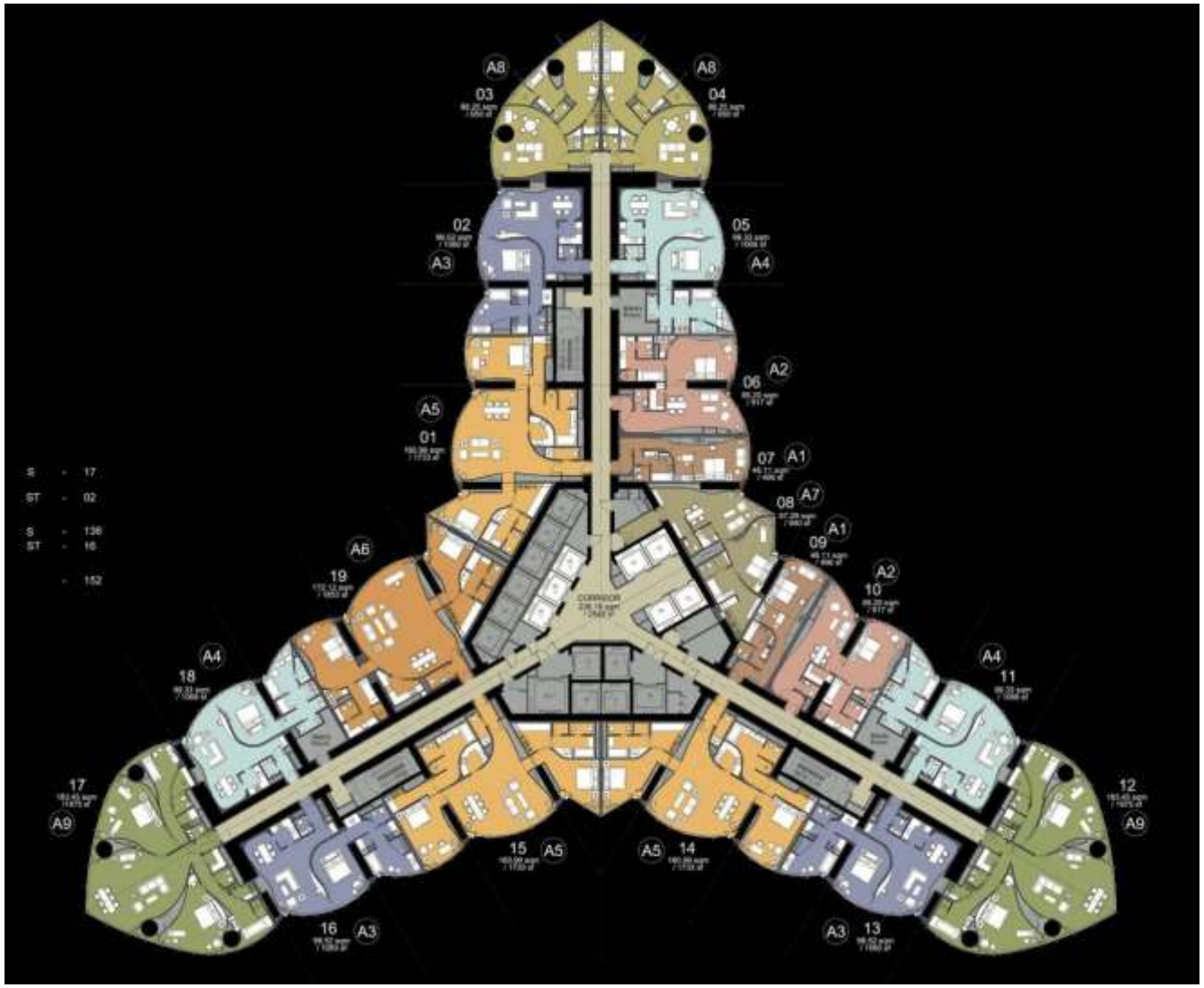
jednostavnost konstrukcijskog sustava i izvodljivost - osnovni parametri projekta.

Odabrani konstrukcijski sustav može se nazvati „jezgra s kontraforima“, kod kojeg svako od tri krila podupire preostala dva preko središnje šesterokutne jezgre.

Konstrukcijski sustav

Zidovi hodnika prostiru se od središnje jezgre uzduž osi krila do čekićastih („hammerhead“) zidova na kraju svakog hodnika.

Stupovi se smješteni po obodu zgrade i na vrhu svakog krila, a stropne konstrukcije su ploče.



Temeljenje

194 na licu mjesta izvedena bušena pilota promjera D=1,5 m duljine oko 43m.
Nosivost pojedinog pilota 3.000 t, pokusno 6.000 t.
Piloti su izvedeni od samozbijajućeg betona (SCC) C60 (čvrstoća cilindra) pomoću kontraktor postupka s polimernim isplakom.
Piloti nose na trenje u čvrstom kalcificiranom siltitnom tlu.
Granična vrijednost trenja po omotaču 0,25-0,35MPa.
Naglavna ploča pilota je debljine 3,7m, utrošeno je 12.500m^3 samozbijajućeg betona C50 (SCC).

Proračun slijeganja temelja proveden je 3D proračunom, temeljenom na rezultatima geotehničkih istražnih radova i pokusnih opterećenja pilota.
Utvrđeno je da će maksimalno slijeganje vremenom biti oko 80mm.

Projektiranje: utjecaj vjetra

Studija vjetrovne klime:
Skupljeni podatci sa više vremenskih postaja u regiji, najvažnije sa međunarodne zračne luke Dubai.

Procijenjena je vrijednost brzine 50-godišnjeg 3-sekundnog udara vjetra od 37,7 m/s za uobičajeni otvoreni teren na visini od 10 m od razine tla.

Prosječna satna brzina, dobivena je proračunom na temelju lokalnih podataka u iznosu od 23,5 m/s za uobičajeni otvoreni teren na visini od 10 m od razine tla. Temeljem tog podatka procijenjena je vrijednost brzine udara vjetra u rasponu od 35,7 m/s do 37,6 m/s, što je potvrdilo prethodni rezultat, te su rezultati mjerenja sa mjerne stanice zračna luka Dubai usvojene kao statistički model za korištenje uz rezultate ispitivanja u zračnom tunelu.

b) Rigid Pressure Tapped Model of Top Portion at 1:50 Scale

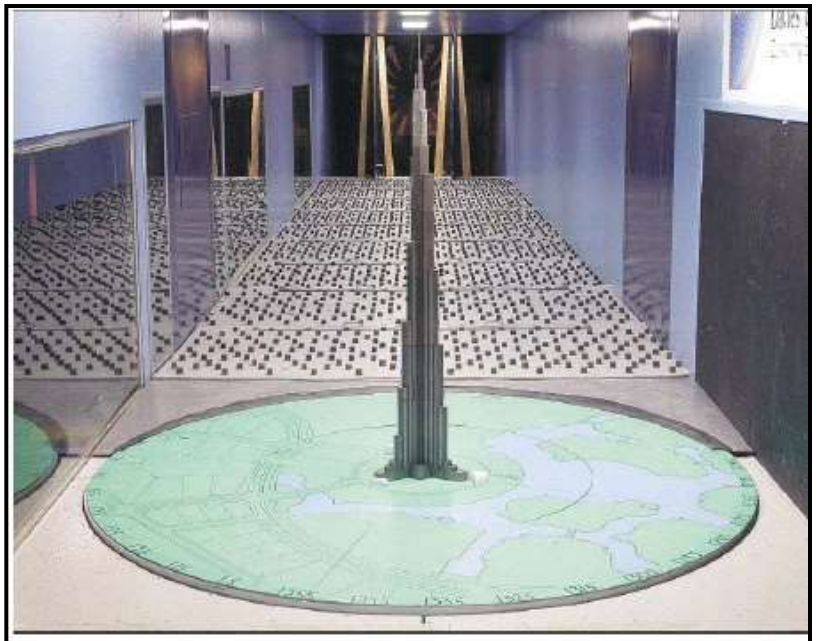
Projektiranje: utjecaj vjetra

Program ispitivanja u vjetrovnom tunelu obuhvatio je:

- pokuse ravnoteže sila na krutom modelu („rigid-model force balance tests“)
- pokuse na potpunom aeroelastičnom modelu,
- mjerenja lokalnih pritisaka

Korišteni su modeli u mjerilu 1:500, ali i u manjem mjerilu.

Obzirom da je kod rezultata utvrđena izvjesna ovisnost o Reynolds-ovom broju (utjecaj mjerila) gornji dio tornja je ispitan na mnogo krućem modelu 1:50



a) Aeroelastic Model at 1:500 scale

Primjeri izvedenih građevina *Bal-Bait Towers, Mecca, Saudijska Arabija*

Primjeri izvedenih građevina *Bal-Bait Towers, Mecca, Saudijska Arabija*

- Najviši toranj sat na svijetu, trenutno 4 najveća zgrada na svijetu
- Kompleks se sastoji od slijedećih zgrada:

Zgrade	Visina	Katova	Izgrađeno
Hotel Tower	601 metres	120	2012
ZamZam	260 metres	48	2011
Hajar	260 metres	48	2011
Qibla	250 metres	45	2011
Maqam	250 metres	45	2012
Safa	240 metres	42	2007
Marwah	240 metres	42	2008

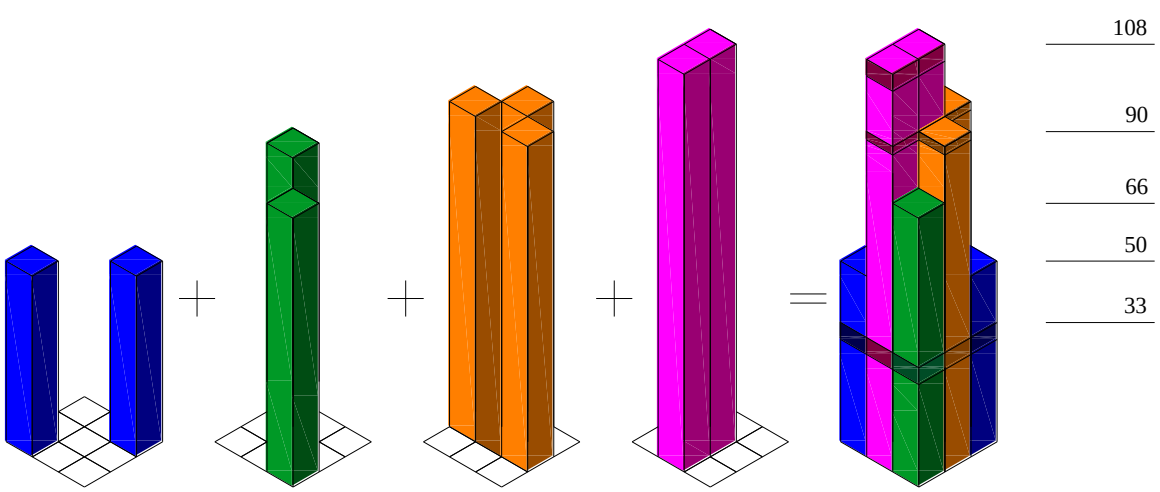
- Najviši toranj ima visinu od 601m, ukupna površina kompleksa 1,500,000 m^2
- Tornjevi sadrže vjerske sadržaje, hotel s 5 zvjezdica, 20 katni trgovački centar i stambeni dio
- Ukupno u kompleksu može boraviti 100.000 ljudi
- Cijena projekta je 15 milijardi dolara

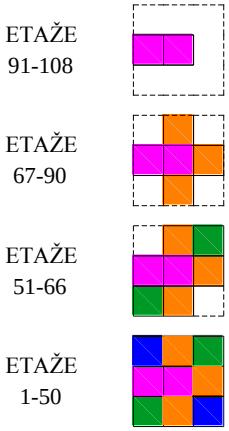
Primjeri izvedenih građevina

Sears Tower, Chicago, SAD

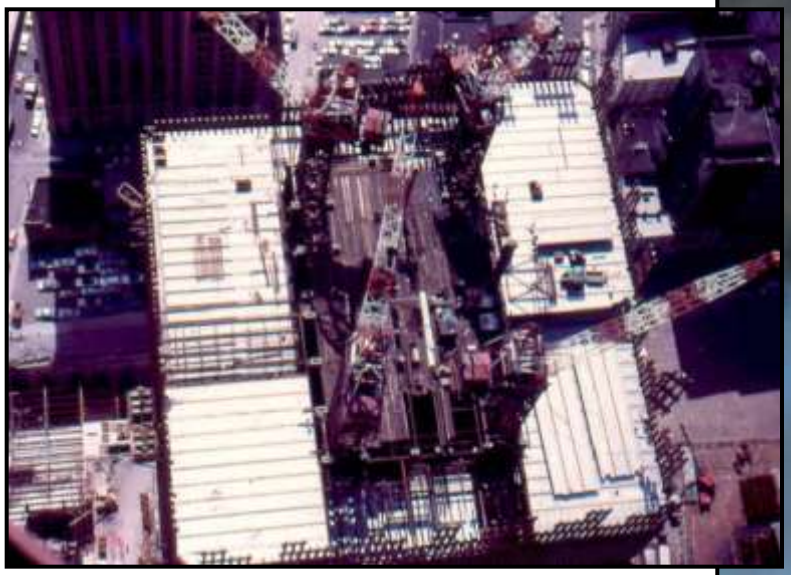
Primjeri izvedenih građevina *Sears Tower, Chicago, SAD*

- Sears ili Willis toranj u Chicagu projektirao je Bruce Graham.
- Zgrada je izgrađena 1974. i broji 108 katova – 442 m.
- Po nosivoj konstrukciji spada u cijevi povezane u snopove. Konstrukcija se sastoji od devet okvirnih cijevi kvadratnog tlocrta dimenzija 25x25 m međusobno povezanih unutarnjim hrptovima.
- Ti hrptovi smanjuju utjecaj posmične fleksibilnost (shear lag) u pojasevima. Naprezanja u stupovima stoga su ravnomjernije raspoređena i fleksijska krutost je znatno veća nego kod sustava pojedinačnih cijevi.





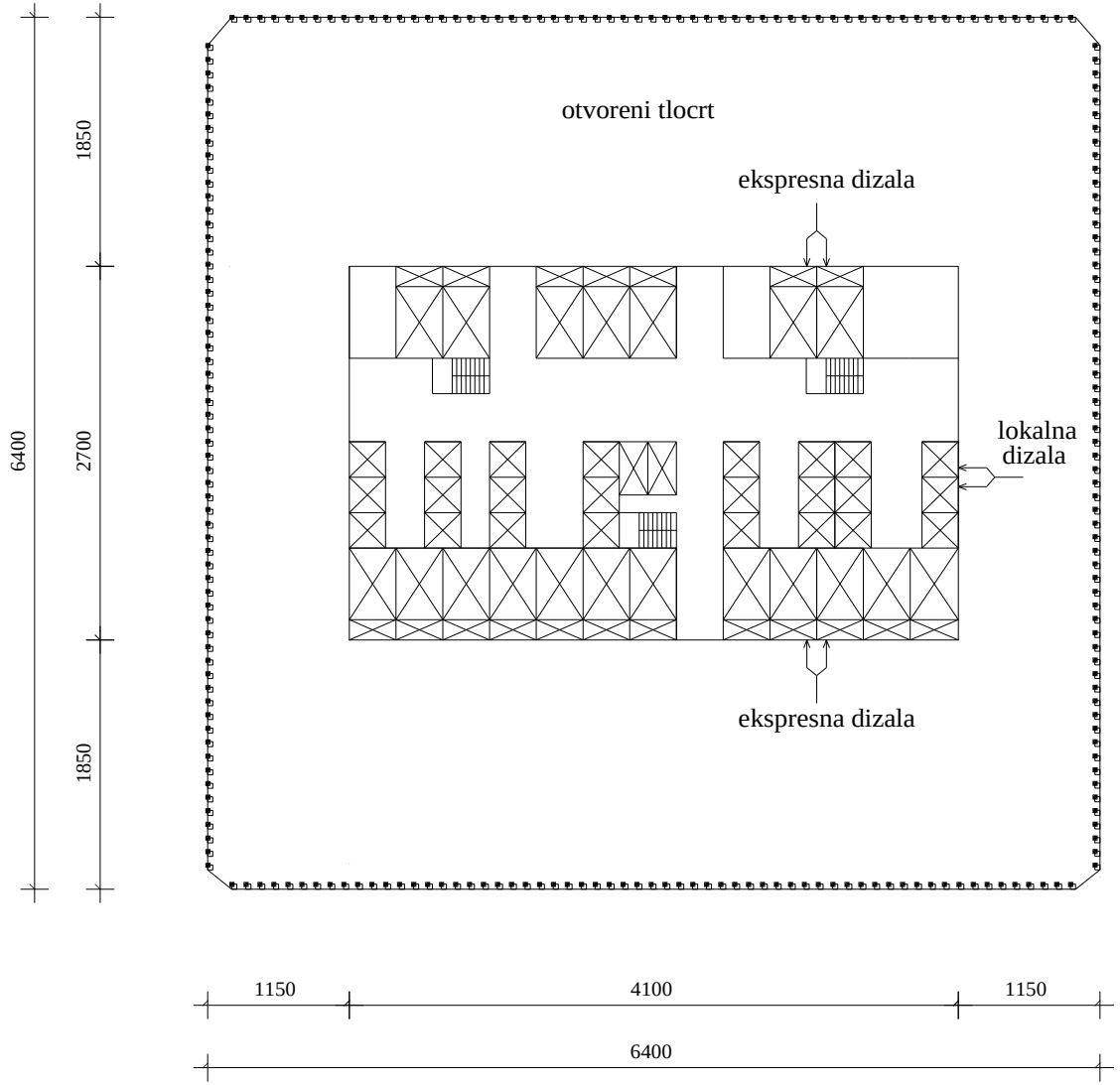
Primjeri izvedenih građevina *World Trade Center, New York, SAD*



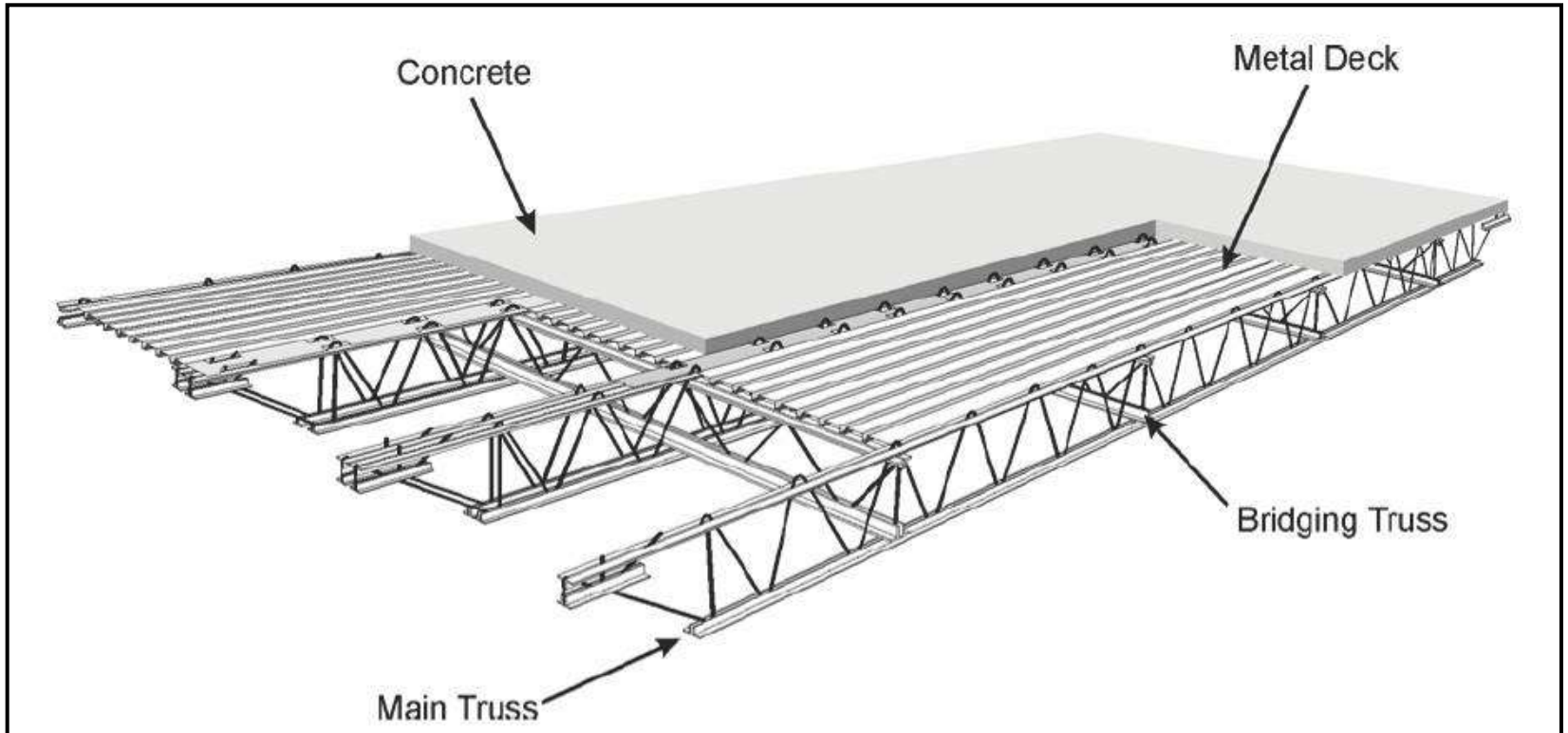
- World Trade Center, odnosno Twin Towers ili Tornjevi Blizanci bili su najviše zgrade na svijetu u vrijeme svog završetka 1973.
- Blizance su sačinjavali sjeverni toranj (1 WTC) s 110 katova ukupne visine 417 m i južni toranj (2 WTC) visine 415 m. Osim ova dva najpoznatija tornja kompleks čini još 5 zgrada, a sve su projektirane od strane japansko - američkog arhitekta Minoru Yamasakija.

Primjeri izvedenih građevina *World Trade Center, New York, SAD*

- Cijevni nosivi sustav sačinjavali su vanjski predgotovljni čelični stupovi dimenzija 36x36cm gusto raspoređeni na razmaku od 1 m povezani snažnim horizontalnim gredama.
- Ovakav sustav preuzima sva horizontalna i dio vertikalnih opterećenja. Preostalo vertikalno opterećenje preuzimaju stupovi središnje jezgre.

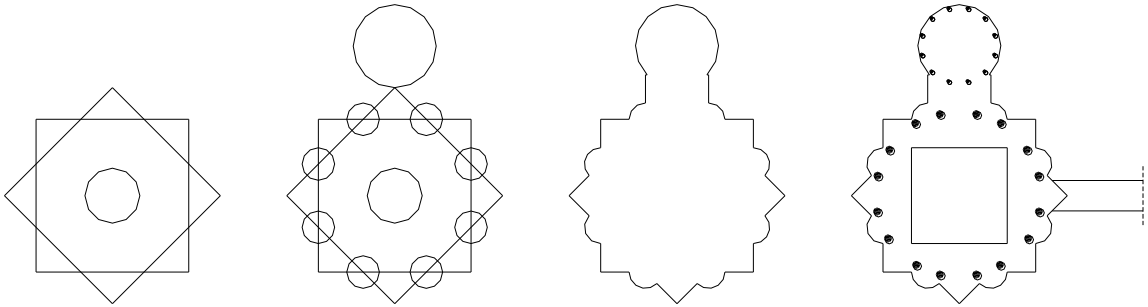


- Stropna konstrukcija sastojala se od ploče laganog betona debljine 10 cm položene na čelični lim i poduprte laganim rešetkastim nosačima.
- Osim što je služila kao dijafragma i prenosila horizontalno opterećenje na vanjske stupove, zbog svog velikog raspona od 18 m omogućila je širok slobodni prostor između jezgre i vanjskog okvira.
- U tome joj je pridonio i sam cijevni sustav s gusto raspoređenim stupovima. Na taj način dobivena je vrlo lagana, ekonomična struktura s jednostavnim tlocrtom.



Primjeri izvedenih građevina *Petronas Towers, Kuala Lumpur, Malezija*

- Tornjevi Petronas najviši su neboderi blizanci na svijetu visine 452 m.
- Tlocrt konstrukcije sastoji se od dva kvadrata koja se preklapaju te tako stvaraju osmerokraku zvijezdu.
- Za takvu formu projektant Cesar Pelli inspiraciju je pronašao u islamskoj kulturi gdje ona predstavlja jedinstvo te prijelaz iz starog u novo.



- Unutarnju strukturu Petronas tornjeva čini betonska jezgra kvadratnog tlocrta, dimenzija 22.5x22.5 m, u kojoj su smještena 78 dvokatna dizala.
- Vanjsku strukturu čine šesnaest široko razmaknutih obodnih stupova cilindričnog presjeka od armiranog betona visoke čvrstoće s prstenastim gredama.
- Na taj način dobiven je sustav okvirnih cijevi gdje vanjska cijev preuzima horizontalno i 75-90 % vertikalnog djelovanja dok ostatak preuzima središnja jezgra.
- Dimenzije stupova variraju od promjera 2.4 m na nižim razinama do 1.2 m pri vrhu.
- Oba tornja su valjkastog oblika s promjerima koji se mijenjaju po visini.

Primjeri izvedenih građevina *Bank of China, Hong Kong*

Bank of China Tower je cijenjen zbog svog geometrijskog oblika, i predstavlja jedno od najistaknutijih postignuća moderne arhitekture.

Arhitekt Leoh Ming Pei projektirao ju je s u maniri elegantne mladice bambusa „koja napreduje sa svakom fazom rasta“. Zgrada je završena 8 dana 8 mjeseca 1988 godine, prema Kinezima najsretnijeg dana prošlog stoljeća.

Po dovršetku Bank of China bila je najviša zgrada u Aziji i prva zgrada izvan SAD, viša od 300 m (315m).

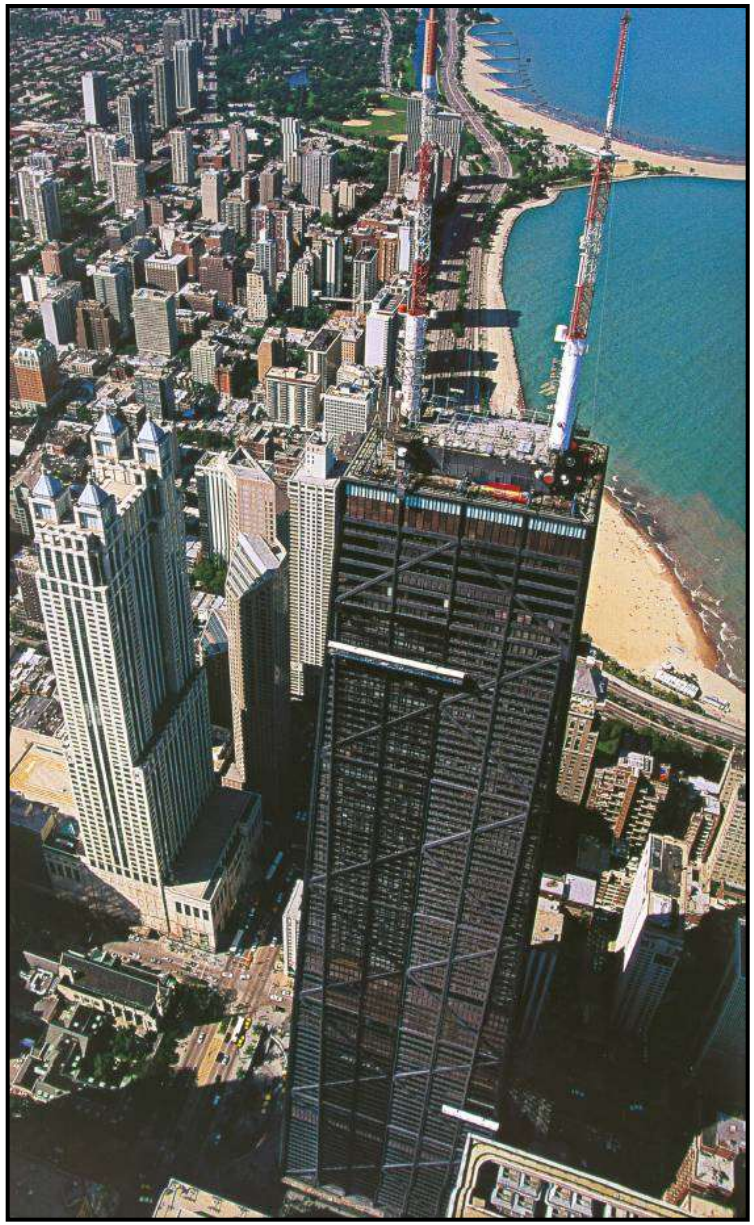
Prvu puta je jedna megastruktura sačinjena od čiste prostorne rešetke korištena za preuzimanje gravitacijskih opterećenja

Osnovno načelo nosive konstrukcije bilo je da i jedan ekscentricitet u pojedinačnom stupu izaziva savijanje, dok dva ili više pravaca ekscentriciteta, povezanih mehanizmom za jednaku poprečnu silu, djeluje suprotno i tako eliminira savijanje.

Pet spregnutih stupova nosivog sustava podupiru okvirnu konstrukciju sa spregovima od čelika koja se proteže između njih.

Težište, oblik i položaj tih stupova mijenja se, kako se spuštaju niz zgradu – uzrok ekscentričnosti.

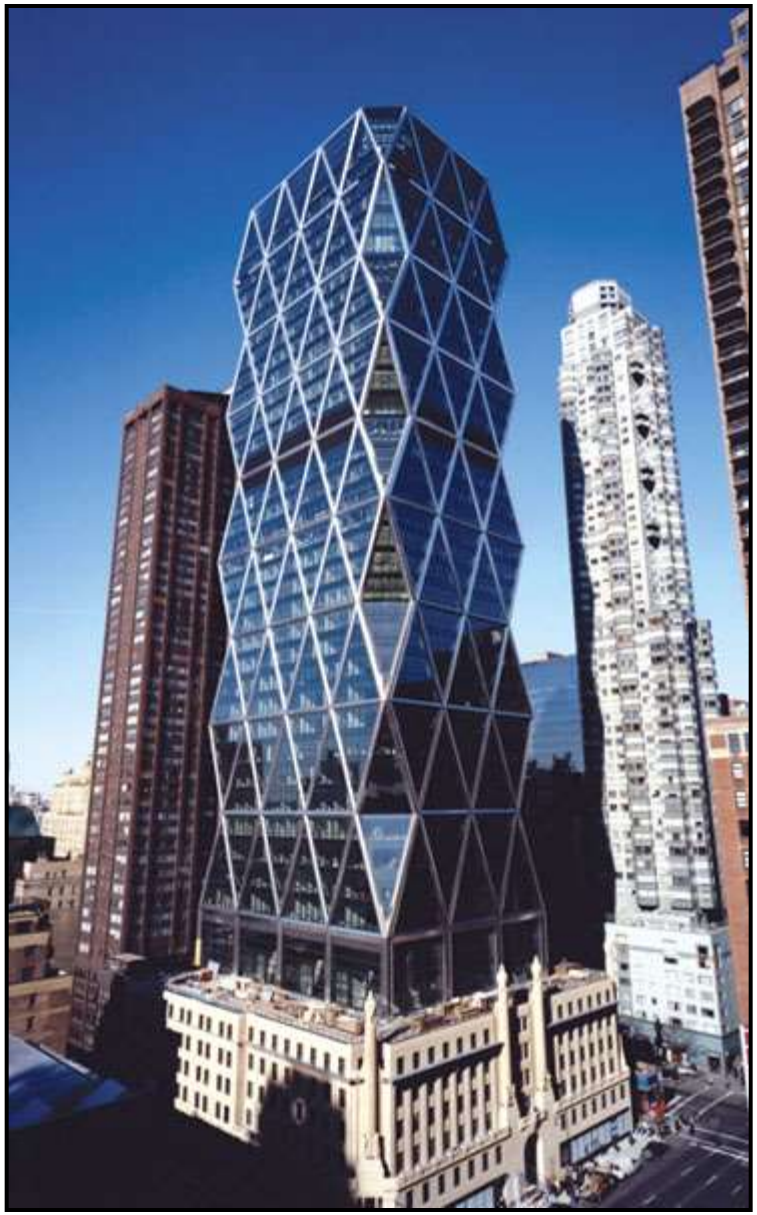
Primjeri izvedenih građevina *John Hancock, Chicago, SAD*



- 100 katova, visina 344 m (s antenama 459m)
- kod otvorenja je bila najviša zgrada na svijetu izvan New Yorka
- Trenutno je četvrta najviša zgrada u Chicagu i sedma u Americi
- U zgradi se nalaze uredi, restorani i oko 700 stanova

- konstrukcijski sustav je cijev sa spregovima, povoljno ponašanje, uklonjen shear lag koji je problematičan kod cijevi

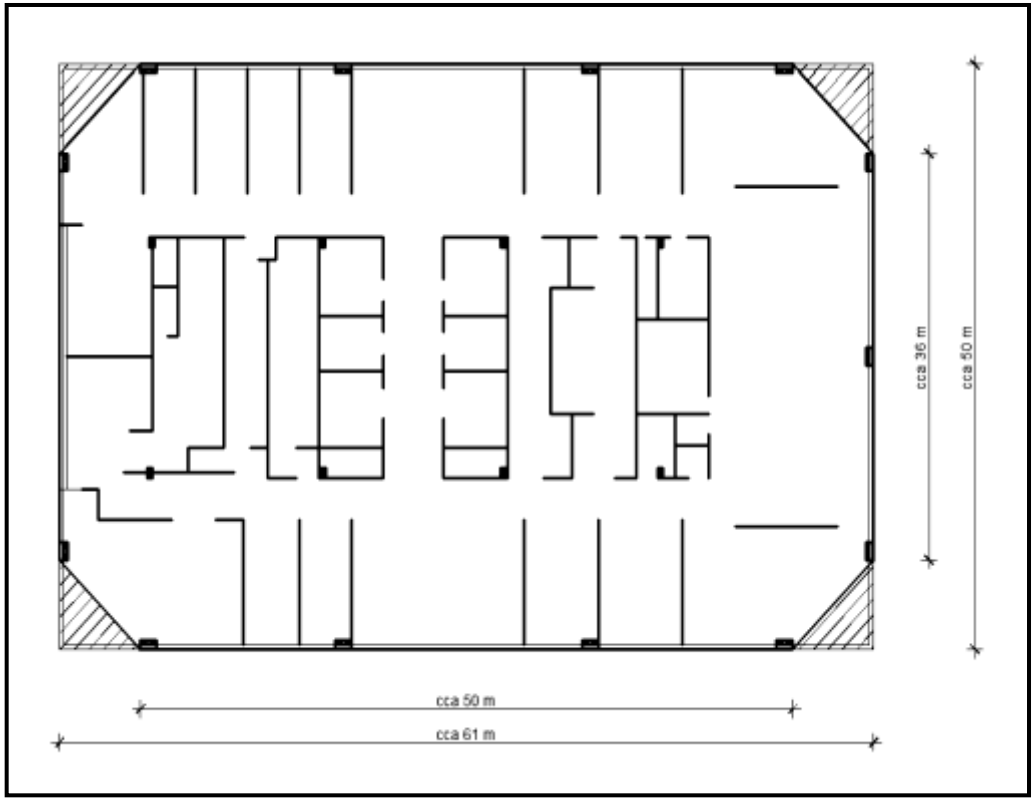
- stoga stupovi mogu biti postavljeni na većem razmaku, što omogućuje mnogo veće prozore nego kod konvencionalnih cijevi

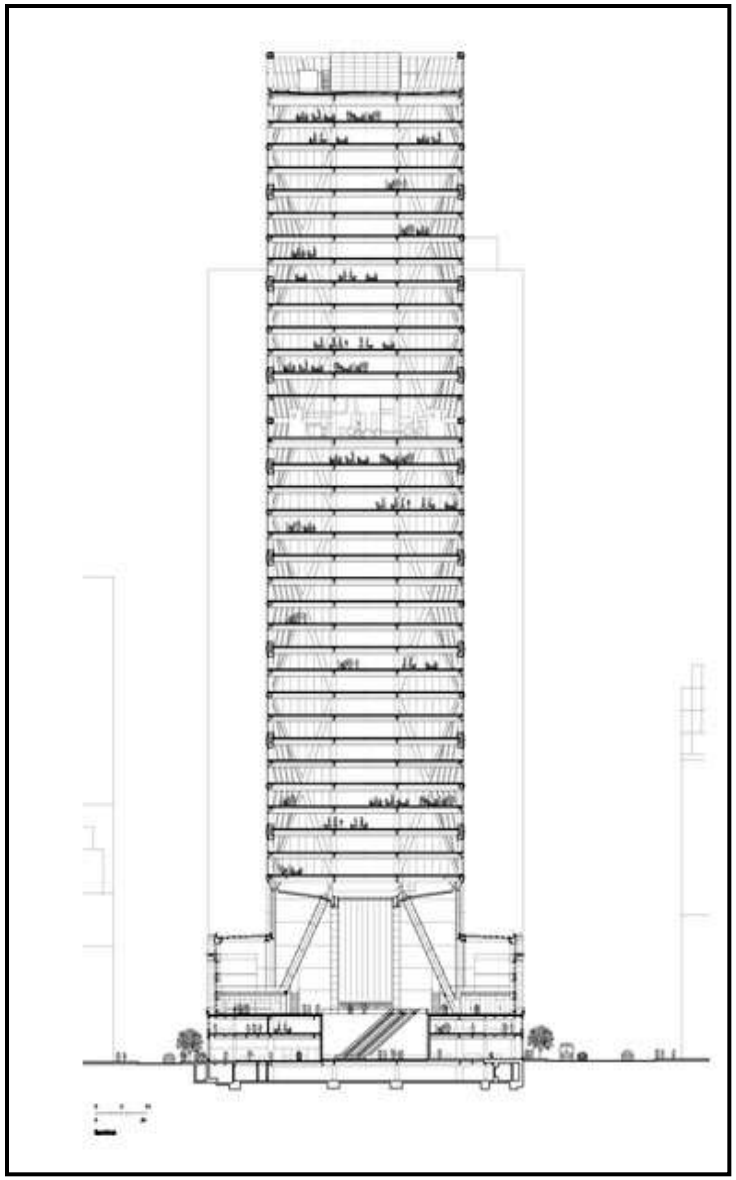


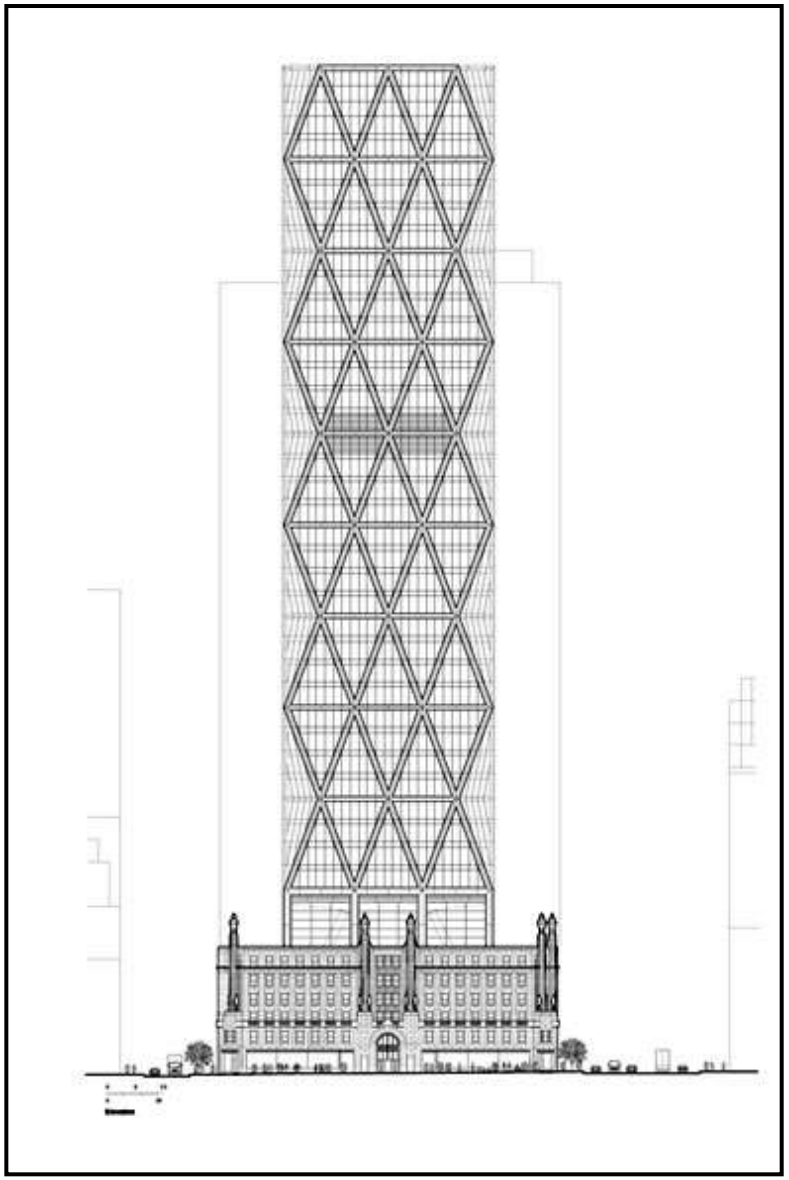
Primjeri izvedenih građevina

Hearst Tower, New York, SAD

- Glavna nosiva konstrukcija leži na postojećoj građevini iz 1928.
- Zgrada ima ukupno 47 katova, s ukupnom površinom oko 80 000 m^2
- 80-95 % prostora iskorišteno za urede
- Prema dokumentaciji građevine, ukupna cijena je iznosila oko 500 milijuna dolara, što je oko 6250 dolara po kvadratnom metru ureda.
- Arhitekti su Foster+Partners, Gensler, Adamson Associates Architects.

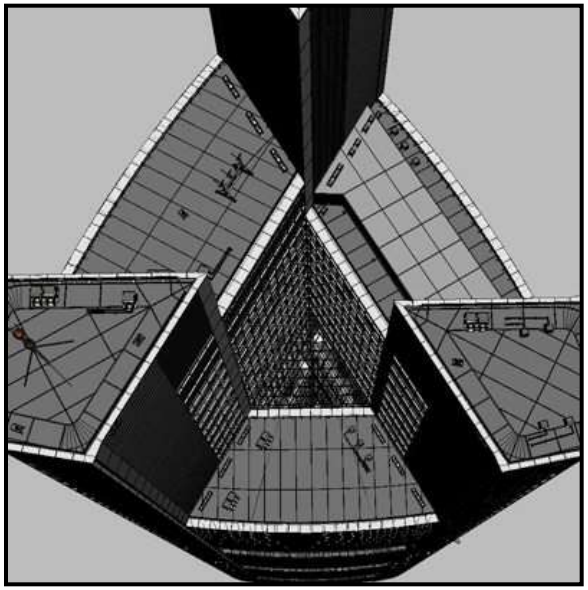


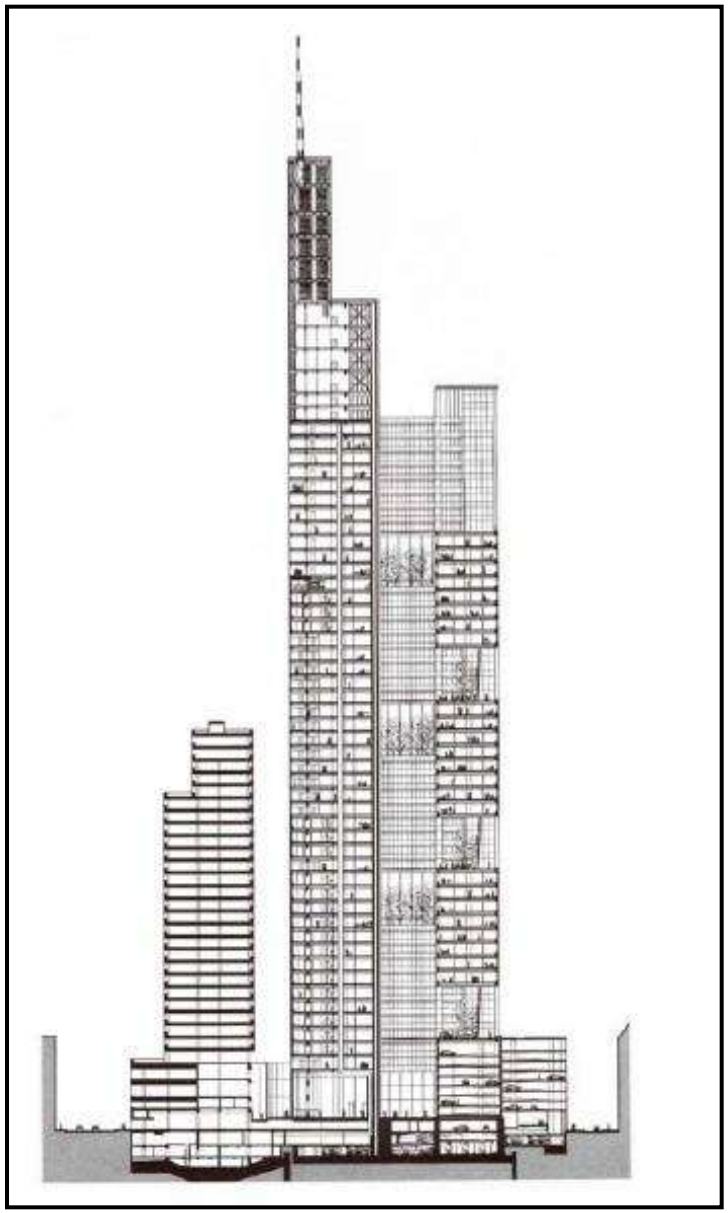




Primjeri izvedenih građevina Commerzbank, Frankfurt, Njemačka

- Zgrada Commerzbanke, prva „zelena“ visoka građevina u svijetu, sagrađena je 1997. a projektirao ju je Norman Forster.
- Zgrada je visoka 300 m i ima 56 katova.
- Nalazi se u samom centru Frankfurta i projektirana je tako da se uklapa u postojeće povijesne građevine i okolne zgrade te se pazilo da na njih ne utječe svojom sjenom.



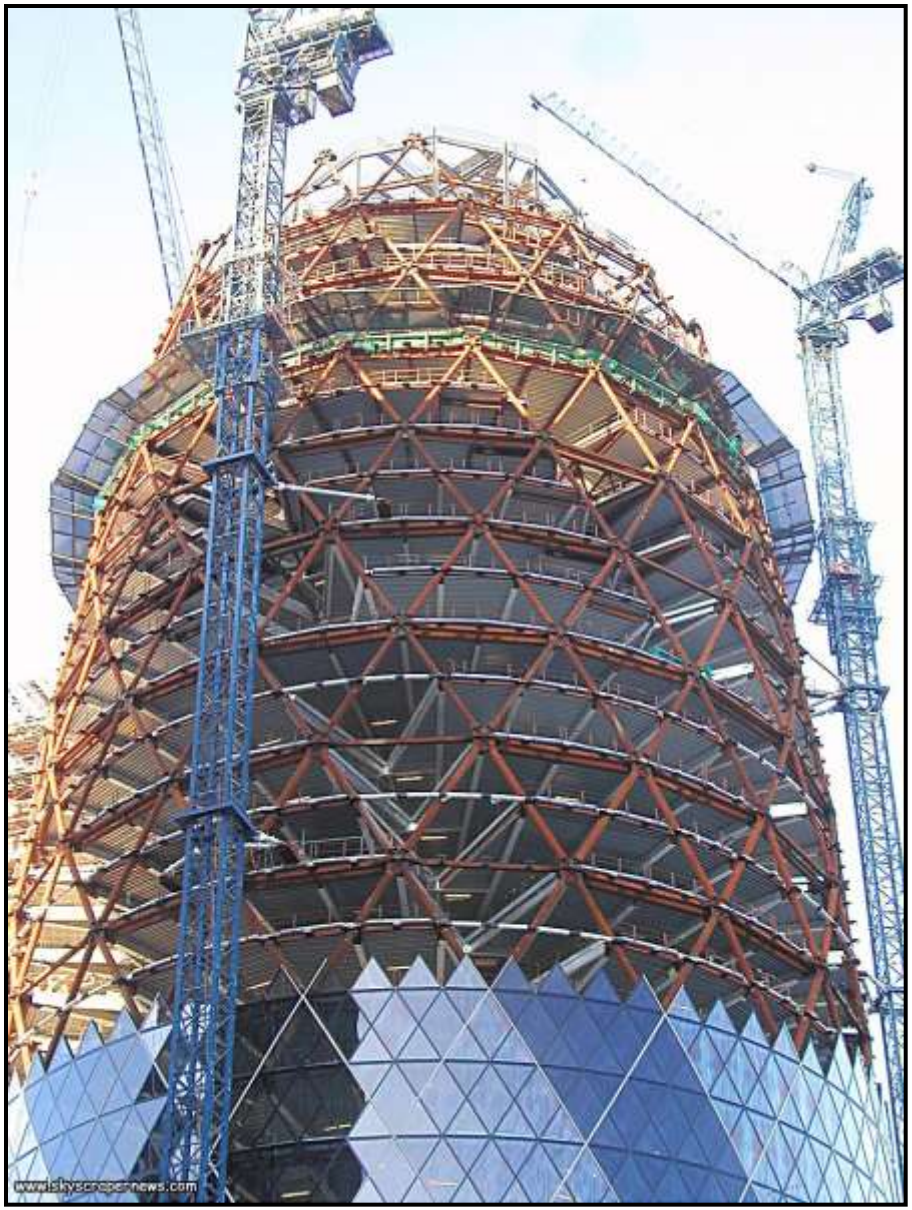


Primjeri izvedenih građevina 30 St Mary Axe, London, UK

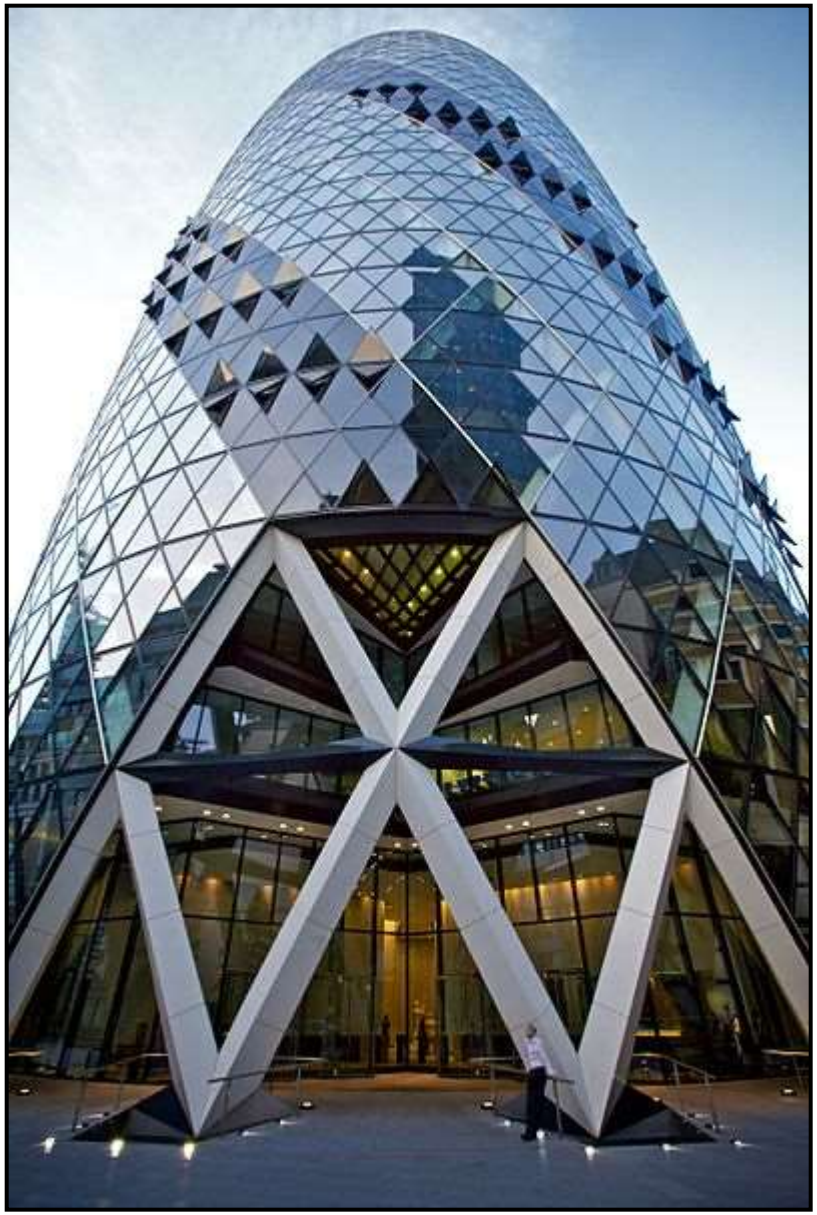
- Ova 180 m visoka zgrada, poznata i pod nazivom Swiss Reinsurance zgrada, sagrađena je 2004. godine.

- Projektirao ju je također Norman Foster, a zgrada je postala simbolom Londona i jednim od najpoznatijih svjetskih primjera moderne arhitekture.

- Sa svojim 41 katom nalazi se u londonskom financijskom centru City u ulici 30 St Mary Axe po kojoj je i dobila ime. Ovaj poslovni neboder je zbog svog futurističkog ali neobičnog oblika postao poznat i pod nazivom „The Gherkin“ što bi u prijevodu značilo kiseli krastavac.



- Ova čelična diagridna struktura zapravo je cijevna konstrukcija po vanjskom obodu koja stvara trokutastu strukturu sa dijagonalnim nosivim štapovima.

- Nizovi trokuta čine stabilnu prostornu konstrukciju koja se ponaša poput ljuske.

- Osim što ovakav konstrukcijski sustav danas predstavlja standard u dizajnu i smatra se lijepim, on oslobađa unutarnji prostor od vertikalnih elemenata te se unutar njega omogućuje maksimalna fleksibilnost interijera.