

ARHITEKTONSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
Inženjerske konstrukcije

Burj Khalifa Dubai
Bank of China Hong Kong

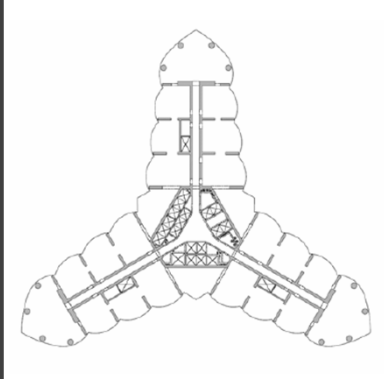


Prema:

- Baker, W. *et al*: The Structural Design of the World's Tallest Structure: The Burj Dubai Tower, *Proceedings of the IABSE Symposium Creating and Renewing Urban Structures*, Chicago, 2008, 1-8.
- 2. Irwin, P.A. *et al*: The BURJ DUBAI TOWER – Wind Tunnel Testing of Cladding and Pedestrian Level, *STRUCTURE magazine*, November 2006, 47-51.

ARHITEKTONSKI DIZAJN

Utjecaj tradicionalne gradnje, šiljasti lukovi, kupole oblika luka, šiljci (spires), pustinski cvijet sa središnjom strukturom i laticama rezultirao je tri-aksijalnom geometrijom sa spiralnim smanjenjem s visinom.



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 se središnja jezgra skida i otkriva jedan šiljak.

VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

ARHITEKTONSKI DIZAJN



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.



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

ARHITEKTONSKI DIZAJN

Središnja jezgra sadrži sve vertikalne liftove i mehaničke podizaae. Toranj servisiraju pet neovisnih servisnih podruaja, razmaknutih za oko 30 katova po visini zgrade.

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



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

ARHITEKTONSKI DIZAJN

Arhitekti i inženjeri su zajedničkim radom razvili oblik i konstrukcijski sustav zgrade, koji učinkovito preuzima dominantno djelovanje vjetrova, a integritet projektnog koncepta je zadržan.

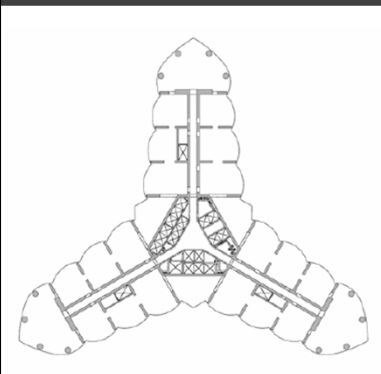


VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

OPIS KONSTRUKCIJSKOG SUSTAVA

Obzirom na dominantni utjecaj vjetra na projektiranje super-visokih zgrada, toranj je oblikovan tako da smanji na najmanju moguću mjeru sile vjetra na njega. Jednostavnost konstrukcijskog sustava i izvodljivost bili su 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 (slika).



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

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

Zatvorena šesterokutna središnja jezgra je torzijski iznimno kruta.

VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

OPIS KONSTRUKCIJSKOG SUSTAVA

Veznim („outrigger“) zidovima smještenim na svim servisnim katovima obodni zidovi su u potpunosti uključeni u otpornost na bočna djelovanja, kao i u preraspodjelu gravitacijskih opterećenja, tako svi vertikalni betonski elementi preuzimaju i gravitacijska i bočna opterećenja

Preraspodjelom gravitacijskih opterećenja uravnotežuju se razine naprezanja u vertikalnim nosivim elementima i time umanjuje utjecaj diferencijalnih skraćivanja, izrazito važan faktor kod ove super-visoke zgrade.



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

OPIS KONSTRUKCIJSKOG SUSTAVA

Smanjenje izmjera zgrade („building setbacks“) smještena su na krajevima raspona konstrukcije, tako da se svi vertikalni elementi direktno nastavljaju, pa nema potrebe za posebnim konstrukcijama za horizontalni prijenos sila.

Rezultat je vrlo elegantna i učinkovita konstrukcija, koja učinkovito koristi sustav za preuzimanje gravitacijskih opterećenja i za preuzimanje bočnih opterećenja.

Zgrada se po visini upušta (smanjuje) u obliku spirale, što znači da se na razini svakog upuštanja širina tornja mijenja; razlog je da se „zbuni vjetar“

Tako ne može doći do pojave vrtloženja jer na svakom novom rasporedu vjetar nailazi na različiti oblik zgrade



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

OPIS KONSTRUKCIJSKOG SUSTAVA

Svi betonski elementi su od betona visokog razreda čvrstoće od C80 do C60 čvrstoće cilindra. Beton je napravljen od portland cementa s dodatkom letećeg pepela („fly ash“).

Beton C80 ima najveći specificirani modul elastičnosti $E=43.800 \text{ MPa}$ kod starosti od 90 dana.

Izmjere zidova i stupova optimizirane su postupkom virtualnog rada s LaGrange-ovim množiteljima, čime je ostvarena vrlo učinkovita konstrukcija.



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

OPIS KONSTRUKCIJSKOG SUSTAVA

Konstrukcija je proračunata za gravitacijska djelovanja (uključivo P- Δ utjecaj), vjetar i potres, koristeći software ETABS 8.4

Trodimenzijski proračunski model sadržavao je armirane betonske zidove, vezne grede, ploče, temeljnu ploču, pilote i konstrukcijski sustav čeličnog šiljka tornja („spire“)

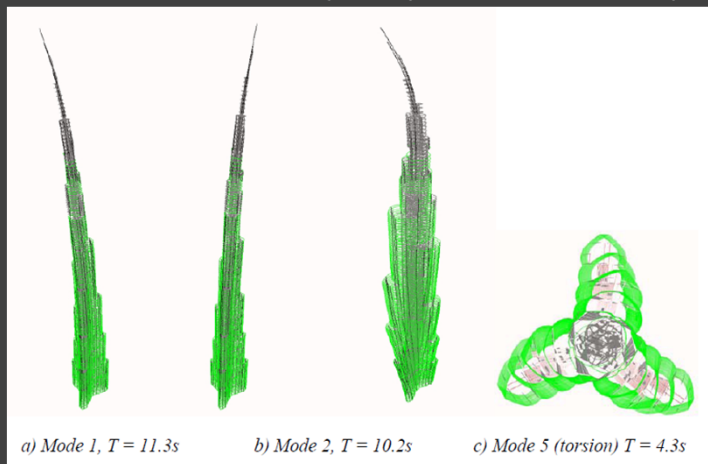
Numerički model činilo je preko 73.500 elemenata ljuske („shell“) i 75.000 čvorova.

Za proračunsko opterećenje vjetrom, uzimajući za betonske elemente u obzir statičke značajke za raspucali beton, elastični P- Δ horizontalni pomak iznosi oko $H/500$ na vrhu betonske jezgre.

VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

OPIS KONSTRUKCIJSKOG SUSTAVA

Dinamičkim proračunom je utvrđeno da je prvi ton bočni pomak (konzola) sa periodom $T=11,3$ s, drugi ton međusobno okomiti bočni pomak (konzola u drugom okomitom smjeru) sa periodom od $T=10,2$ s, a torzijski ton je peti sa periodom titranja od $T=4,3$ s (Slika).



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

OPIS KONSTRUKCIJSKOG SUSTAVA

Potresni proračun je proveden za UBC97 zonu 2a sa potresnim ubrzanjem $Z=0,15$ i kategoriju tla S_c . Seizmički proračun sačinjen je spektralnom analizom temeljem spektra odgovora za točnu lokaciju tornja.

Osim spektra odgovora izvještaj je sadržavao i potresnu „hazard“ analizu. Provjerena je i potencijalna opasnost od likvefakcije tla pomoću više priznatih postupaka, ali je utvrđeno da likvefakcija nema konstrukcijske posljedice na duboke temelje tornja.

Potresno djelovanje nije bilo kritično za dimenzioniranje betonskog dijela tornja, ali jest za konstrukciju čeličnog šiljka na vrhu zgrade.

Armirano betonski elementi dimenzionirani su sukladno zahtjevima američkog propisa ACI 318-02 *Building Code Requirements for Structural Concrete*.

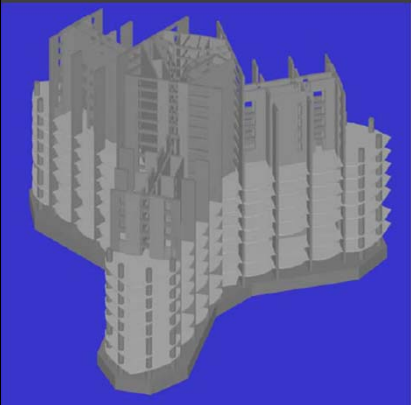
Čelični šiljak sa dijagonalnim spregovima, dimenzionirana je na gravitacijska djelovanja, vjetar, potres i zamor prema zahtjevima AISC *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings* (1999).

Vanjske plohe zaštićene su od korozije aluminijskim premazom pomoću plamenika.

VISOKE GRAĐEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

OPIS KONSTRUKCIJSKOG SUSTAVA

Proveden je proračun faza izvedbe, uključujući utjecaje puzanja i skupljanja (slika 5a).

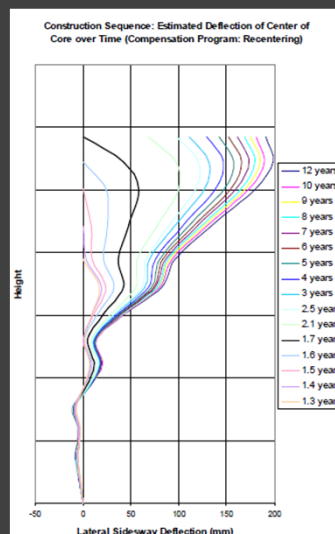


Obzirom da su vertikalni betonski elementi približno jednako tlačno opterećeni, zgrada se za utjecaje puzanja i skupljanja ponaša dobro.

VISOKE GRAĐEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

OPIS KONSTRUKCIJSKOG SUSTAVA

Proračunom faza izvedbe, temeljenom na vraćanju u početni položaj (re-centering“) na svakoj sljedećoj sekciji stupova jezgre, dobivena je procijenjena vrijednost bočnog pomaka vrha jezgre od 200mm nakon 10 godina od završetka izvedbe (slika 5b).



VISOKE GRAĐEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

OPIS KONSTRUKCIJSKOG SUSTAVA

Temeljenje

Temeljenje čini 194 na licu mjesta izvedena bušena pilota, promjera $D=1,5$ m i duljine oko 43m. Nosivost pojedinog pilota iznosi 3.000 t, s time da je pokusno opterećen sa 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 silitnom tlu. Granična vrijednost trenja po omotaču iznosila je 0,25-0,35MPa.

Naglavna ploča pilota je debljine 3,7m i izvedena od 12.500m³ 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.



VISOKE GRAĐEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

DJELOVANJE VJETRA („wind engineering“)

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 prikladni statistički model za korištenje uz rezultate ispitivanja u zračnom tunelu.

VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

DJELOVANJE VJETRA („wind engineering“)

Ispitivanja u vjetrovnom tunelu:

Program ispitivanja u vjetrovnom tunelu obuhvatio je pokuse ravnoteže sila na krutom modelu („rigid-model force balance tests“) slika 6a, pokuse na potpunom aeroelastičnom modelu, mjerenja lokalnih pritisaka i studiju utjecaja na pješake. Uglavnom su korišteni 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 (slika 6b).



a) Aeroelastic Model at 1:500 scale



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

VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

DJELOVANJE VJETRA („wind engineering“)

Opterećenje vjetrom na glavnu konstrukciju

Za određivanje opterećenja vjetrom na glavnu konstrukciju u ranoj projektnoj fazi provedena su ispitivanja u vjetrovnom tunelu primjenom postupka „high-frequency-force-balance“.

Podatci iz vjetrovnog tunela onda su kombinirani s dinamičkim značajkama tornja, da bi se izračunali dinamički odgovor tornja i cjelokupna efektivna raspodjela sila vjetra u punom mjerilu.

Rezultati ispitivanja ravnoteže sila („force balance“) korišteni su kao rani ulazni podatci za projektiranje, čime je omogućena izrada parametarskih studija za različite krutosti i raspodjele masa tornja.

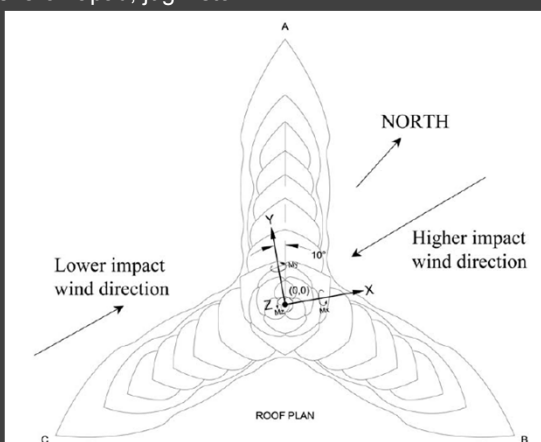
VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

DJELOVANJE VJETRA („wind engineering“)

Za zgradu su bitna 6 smjerova vjetra, tri kad vjetar puše direktno u smjeru jednog od krila i druga tri kad puše u smjeru simetrale između krila (slika 7). Veći utjecaj utvrđen je za ove druge smjerove pa je i zgrada sukladno orijentirana, relativno na najčešće smjerove jakih vjetrova u Dubai-ju: sjevero-zapad, jug i istok.

Ova ispitivanja u vjetrovnom tunelu ponavljana su, kako se geometrija tornja razvijala. Tri krila su redom umanjivana po visini, u smjeru kazaljke na satu počevši od krila A.

Nakon svake runde ispitivanja u vjetrovnom tunelu, podatci su ponovno analizirani i zgrada je preoblikovana tako da se minimizira utjecaj vjetra.



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

DJELOVANJE VJETRA („wind engineering“)

Općenito je mijenjan broj i razmak smanjenja izmjera („setbacks“), kao i oblika krila. Taj postupak rezultirao je bitnim smanjenjem sila vjetra na toranj uslijed „zbunjivanja“ vjetra. Na slikama 8a i 8b prikazan je odgovor zgrade na djelovanje vjetra za prvobitnu konfiguraciju i nakon nekoliko dotjeravanja.

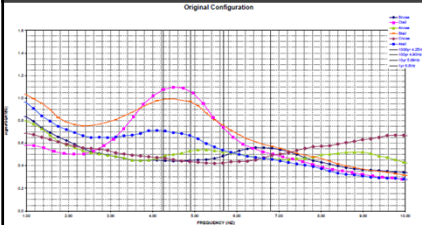


Fig. 8a: Spectra of across-wind modal force for original configuration

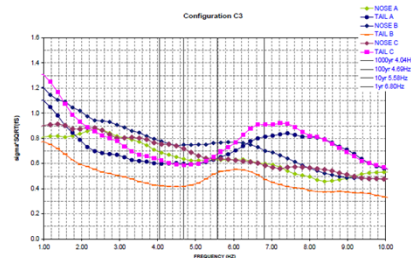


Fig. 8b: Spectra of across-wind modal force for refined configuration (C3)

Na slikama je horizontalna os frekvencija modela iz vjetrovnog tunela, koja se može dovesti u vezu s povratnim periodom za djelovanje vjetra a vertikalna os je proporcionalna rezonantnim dinamičkim silama podijeljenim s kvadratom brzine vjetra.

VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

DJELOVANJE VJETRA („wind engineering“)

Pri kraju projektiranja napravljeni su točnija aeroelastična modelska ispitivanja. Aeroelastični model je fleksibilan, kao i stvarna zgrada, sa ispravno skaliranom krutosti, masom i prigušenjem.

VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

POMACI ZGRADE

Temeljem rezultata ispitivanja „high-frequency-force-balance“ postupkom kombiniranih sa statističkim podacima lokalnih vjetrova, procijenjeni su pomaci zgrade kao funkcija vršnih ubrzanja za različite povratne periode u rasponu od 1 do 10 godina. Prvobitne procjene bile su preko 0,037 g za povratni period od 5 godina, što je daleko više od vrijednosti preporučenih vrijednosti ISO standarda.

Na, kombinacijom preorijentacije tornja, prilagodbe oblika, modifikacije konstrukcijskih značajki i provedbe detaljnih studija statistike vjetra u regiji, te su vrijednosti bitno smanjene na oko 0,019 g za jednaki povratni period. Oko pola poboljšanja bilo je posljedica detaljnijeg poznavanja statistike vjetra, a ostatak rezultat preorijentacije, konstrukcijskih poboljšanja i prilagodbe oblika.

Naknadno, kada su na raspolaganje dobijeni rezultati aeroelastičnog modela procjene su još poboljšane. Dobivena su ubrzanja reda veličine 0,012 g, daleko manja nego ranije, što ukazuje na važnost uzimanja u obzir aeroelastičnih utjecaja u slučajevima kada pomaci zgrade imaju značajne posljedice.

VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

VISOKE GRAĐEVINE

BANK OF CHINA TOWER Hongkong



VISOKE GRAĐEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

Bank of China tower je vrlo cijenjena visoka zgrada zbog svog neobičnog geometrijskog oblika, nazivana „blistavim tornjem od dijamanta“ i predstavlja jedno od najistaknutijih postignuća moderne arhitektura.

Arhitekt Ieoh 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 (1.000“).



VISOKE GRAĐEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

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

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.

Obzirom da beton „lijepi“ čelik na sebe, savijanje je isključeno.



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

Podij je prekriven laganim granitom, pa izgleda kao da je podnožje zgrade ukorijenjeno u tlo.

Geometrija se mijenja od kvadratne baze na četiri trokuta, zatim se četvrtine gube, prvi trokut na visini 25 kata, drugi na 38 katu i treći na 51 katu.

Geometrijske promjene, konačno rezultirajući jednim šiljkom formiraju višeplošnu fasadu od kutova i profila, koja reflektira svjetlo i čini se u kompoziciji gotovo kristalna.



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor

Zavjesa predstavlja jedinstveni dizajn, sklopljen van gradilišta pod radioničkim uvjetima.

To je omogućilo izvrsnu kontrolu kakvoće svih uvjeta izvedbe okvira, koji sadrži više od 10.000 pojedinih elemenata.



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor



VISOKE GRADEVINE, prof.dr.sc. Zlatko Šavor