

سازه های فوق بلند بستی

دکتر علیرضا خالو

رئیس انجمن علمی بتن ایران

دانشگاه صنعتی شریف

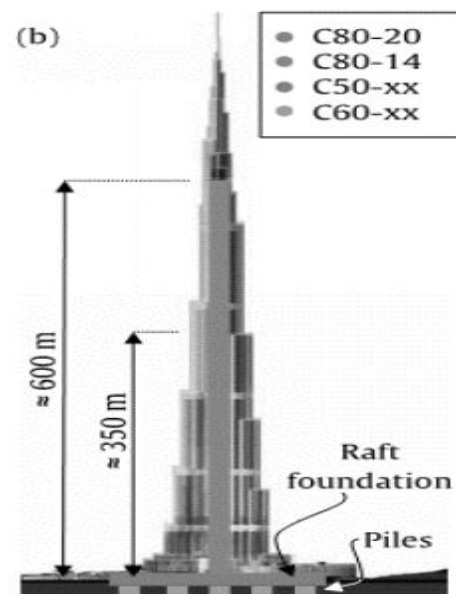
تمهیدات و الزامات

❖ مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بسیار بالا با استفاده از بتن HSC



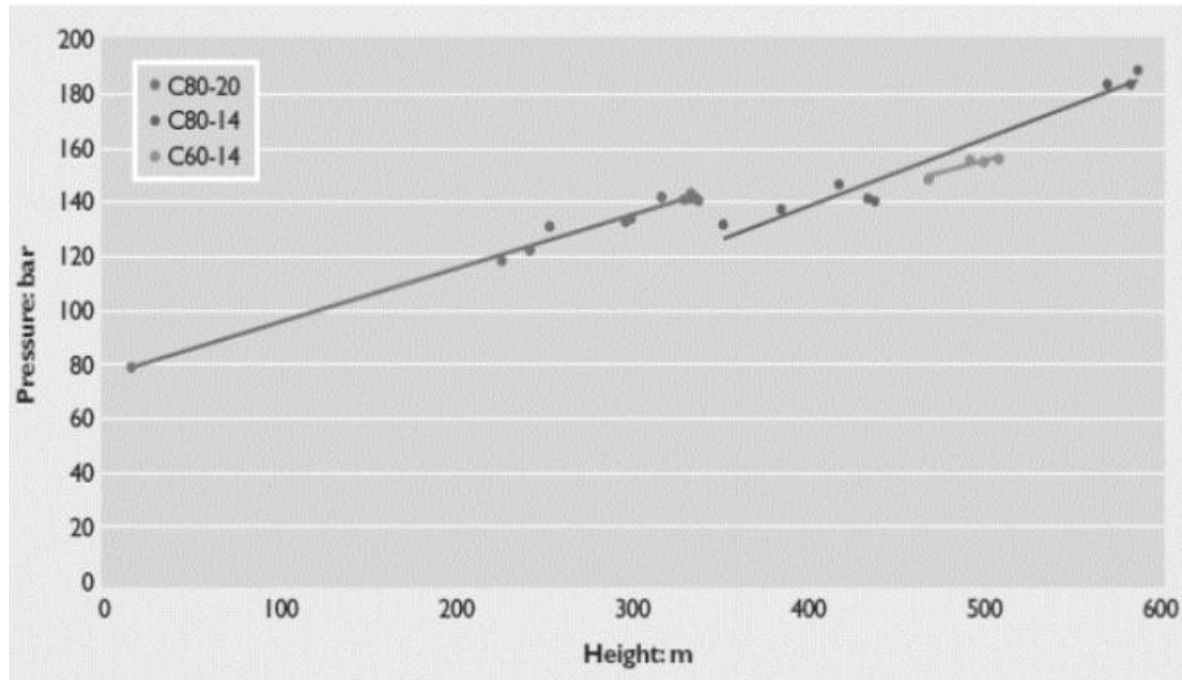
نمای برج خلیفه



مقاومت فشاری نهایی (MPa) و اندازه بزرگترین سنگدانه (mm)

❖ پمپ کردن و قابلیت حمل

- ✓ جلوگیری از انسداد بتن با تامین ریز دانه کافی
- ✓ جایگزینی ۱۰ درصد دوده سلیس
- ✓ جایگزینی ۵۰ درصد سنگدانه ریز
- ✓ استفاده از افزودنی دیرگیرکننده
- ✓ انتخاب قطر لوله حداقل ۴ برابر بزرگترین دانه



افزایش فشار پمپ بتن با افزایش ارتفاع در برج خلیفه

❖ کارایی - فشار جانبی روی قالب

✓ جلوگیری از انسداد بتن در شبکه های آرماتور

به خصوص در اعضای باربر قائم مانند ستون ها و شمع ها

✓ استفاده از بتن خود تراکم

✓ تامین قالب قوی به علت فشار جانبی زیاد بتن خودتراکم



شبکه های متراکم آرماتور در برج خلیفه

❖ مدول الاستیک - جمع شدگی و خزش بتن

- ✓ تامین مدول الاستیسیته بالا به علت افزایش ظرفیت باربری مقطع
- ✓ استفاده از سنگدانه سخت علیرغم بوجود آمدن سایش در لوله انتقال
- ✓ سنگدانه آهکی دولومیتی در برج خلیفه با مدول الاستیک بالا و سایش کم



آزمایشهای گستره مکعب و ستونهای بتنی

❖ جمع شدگی و خزش بتن

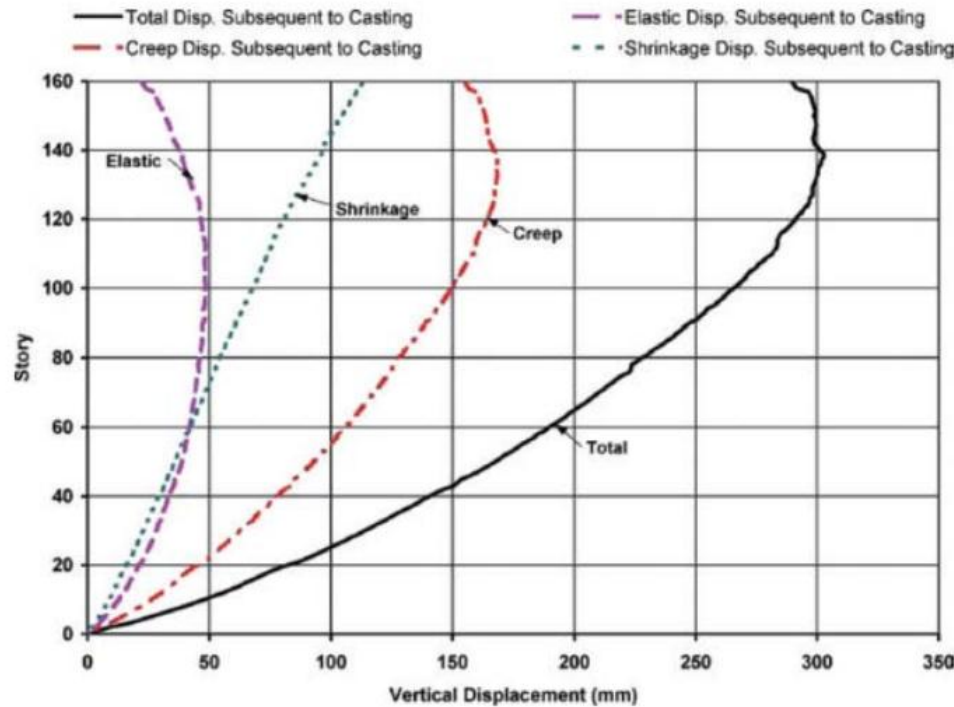
✓ جمع شدگی به علت خشک شدگی بتن

✓ ترک های شدید اولیه به علت دمای بالای محیط و هیدراسیون بتن

✓ اسپری کردن روی اعضا، موثرترین روش عمل آوری

✓ ایجاد تنش در آرماتورها به علت کوتاه شدگی

✓ پیش بینی کوتاه شدگی بتن در اجرا



مشارکت در کوتاه شدگی پیش بینی شده برای الاستیک، جمع شدگی و خزش

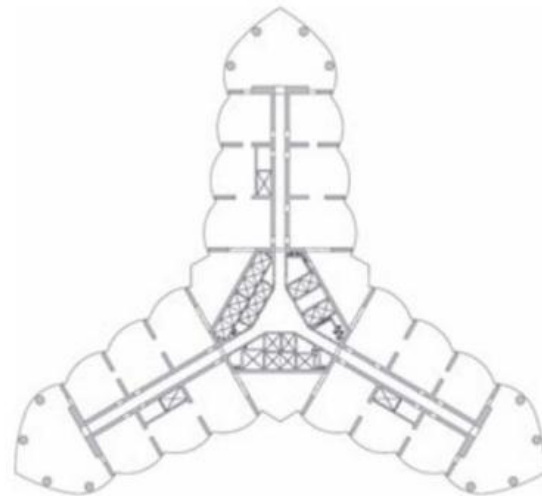
❖ مطالعه موردی

۱) برج خلیفه (امارات متحده عربی)

✓ ارتفاع ۸۲۸ متر، ۱۶۳ طبقه مسکونی، زیربنا ۱۸۶۰۰۰ متر مربع

✓ ۶ سال پروسه ساخت

✓ اجرا به صورت حرف Y جهت سختی پیچشی و جانبی بالا



نما و پلان سازه

■ آنالیز و طراحی

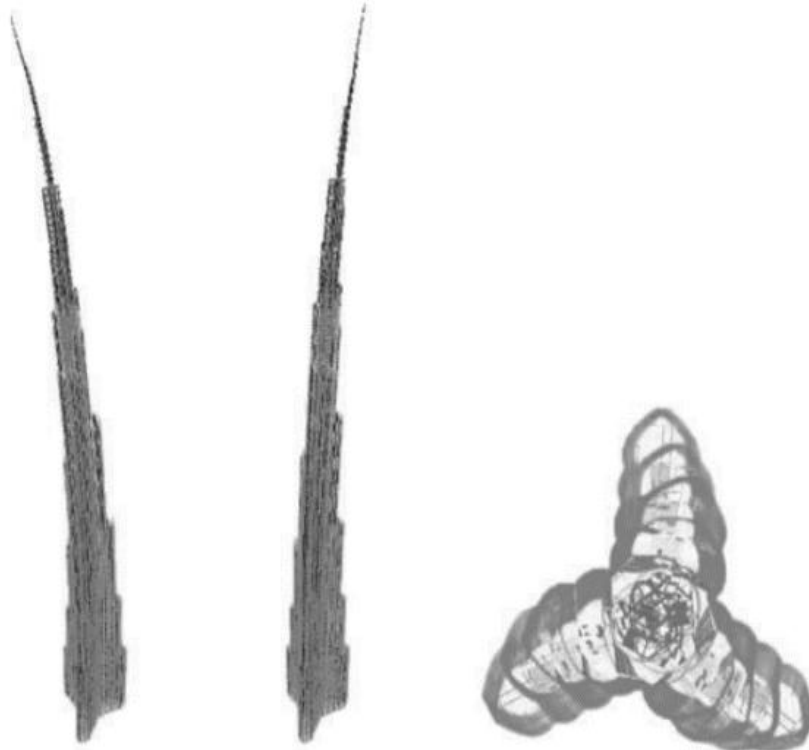
✓ هسته بتنی تا ارتفاع ۵۸۶ متر

✓ قسمت بالای برج سازه فلزی مخروطی به عنوان سیستم

مقاوم جانبی

✓ مدل آنالیز شده دارای ۷۳۵۰۰ صفحه و ۷۵۰۰۰ گره

✓ پیروود اول سازه ۱۱,۳ ثانیه



اشکال مودی سازه پس از آنالیز

■ فونداسیون



فونداسیون برج خلیفه

✓ حجم بتن ریزی ۴۵ هزار مترمکعب

✓ ارتفاع فونداسیون ۳/۷ متر

✓ مقاومت ۵۰ مگاپاسکال

✓ بتن ریزی در چهار قسمت (سه بال و هسته اصلی)

✓ نسبت آب به سیمان ۰/۳۴

✓ فونداسیون شامل ۱۹۴ شمع درجا

✓ قطر شمع ۱/۵ متر و طول ۴۳ متر

Building structure

[aparat.com/samenir](https://www.aparat.com/samenir)

■ فونداسیون

✓ حجم بتن ریزی ۴۵ هزار مترمکعب

✓ ارتفاع فونداسیون ۳/۷ متر

✓ مقاومت ۵۰ مگاپاسکال

✓ بتن ریزی در چهار قسمت (سه بال و هسته اصلی)

✓ نسبت آب به سیمان ۰/۳۴

✓ فونداسیون شامل ۱۹۴ شمع درجا

✓ قطر شمع ۱/۵ متر و طول ۴۳ متر



فونداسیون برج خلیفه



برج الحمرا

٢) برج الحمرا (کویت)

✓ ارتفاع ٤١٣ متر، ٨٠ طبقه، زیربنا ١٩٥٠٠٠ متر مربع

✓ پروسه اجرا ٨ سال

✓ سازه بتنی

✓ ارتفاع فونداسیون ٤ متر

✓ ٢٨٩ شمع درجا به قطر ١/٢ متر و طول ٢٧ متر

✓ دال های با ضخامت ١٦ سانتی متر

✓ ضخامت تیرها ٧٠ سانتی متر



برج Aqua

۳) برج Aqua (شیکاگو)

- ✓ ارتفاع ۲۶۲ متر، ۸۱ طبقه، زیربنا ۱۸۵۰۰۰ متر مربع
- ✓ پروسه اجرا ۴ سال
- ✓ هزینه ساخت ۴۷۵ میلیون دلار
- ✓ دیوارهای برشی در طول سازه
- ✓ دارای یک کمربند در میان برج برای حفظ یکپارچگی ستون ها



برج Hearst

٤) برج Hearst (نیویورک)

- ✓ ارتفاع ۱۸۲ متر، ۴۶ طبقه، زیربنا ۷۹۵۰۰ متر مربع
- ✓ پروسه اجرا ۳ سال
- ✓ کاربری اداری
- ✓ سازه اصلی از اتصال چند مثلث، موجب کاهش ۲۰ درصد وزن فولاد
- ✓ ۹۰ درصد از ۱۰۴۸۰ تن فولاد مصرفی، بازیافتی

۵) برج Bank of America (نیویورک)



برج Bank of America

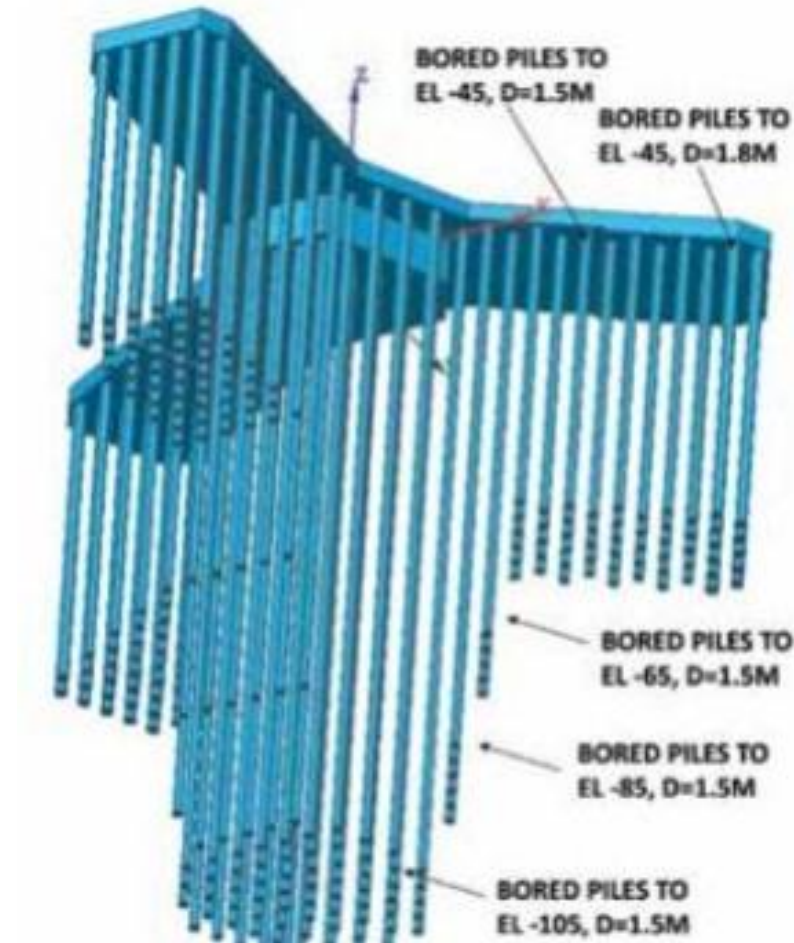
- ✓ ارتفاع ۳۶۶ متر، ۵۶ طبقه، زیربنا ۱۹۵۰۹۸ متر مربع
- ✓ پروسه اجرا ۶ سال
- ✓ کاربری تجاری
- ✓ هزینه ساخت ۱,۲ میلیارد دلار
- ✓ ۳۵ درصد سیمان پرتلند بتن سازه، سرباره کوره ذوب آهن
- ✓ هسته سبک فلزی در مرکز به همراه دیوار برشی
- ✓ استفاده از سیستم قاب خمشی محیطی



برج Jeddah

٦) برج Jeddah (عربستان)

- ✓ ارتفاع ۱۰۰۰ متر، ۱۶۷ طبقه روی زمین و ۲ طبقه زیر زمین
- ✓ پروژه اجرا از ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸
- ✓ مقاومت بتن ۸۵ و ۶۵ و ۷۵ مگاپاسکال
- ✓ سیستم باربر جانبی دیوار برشی بتنی و دمپر وزنی
- ✓ ارتفاع فونداسیون بین ۴/۵ تا ۵ متر
- ✓ ۵۹ آسانسور



- ✓ ارتفاع فونداسیون بین ۴/۵ تا ۵ متر
- ✓ ۲۲۶ شمع به قطر ۱/۵ متر و ۴۴ شمع به قطر ۱/۸ متر
- ✓ طول شمع ها بین ۴۵ تا ۱۰۵ متر

فونداسیون برج Jeddah



برج Suzhou Zhongnan Center

۷) برج Suzhou Zhongnan Center (چین)

✓ ارتفاع ۷۲۹ متر، ۱۳۷ طبقه روی زمین و ۵ طبقه زیر زمین

✓ پروژه اجرا از ۲۰۱۴

✓ پیرو ساخت ۹/۳ ثانیه

✓ سیستم باربر جانبی هسته بتنی به همراه کمر بند میانی خرپایی

✓ ارتفاع فونداسیون گسترده ۶/۳ متر

✓ ۷۱۹ شمع به ضخامت ۱/۱ متر و طول ۱۱۰ متر

۸) برج ۱۱۸ Merdeka PNB (مالزی)

✓ ارتفاع ۶۴۴ متر، ۱۱۸ طبقه روی زمین و ۵ طبقه زیر زمین

✓ پروژه اجرا از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱

✓ دارای ۸ ستون بتنی بسیار بزرگ به همراه ۶ کمر بند خریایی

به عنوان سیستم باربر جانبی

✓ ارتفاع فونداسیون گسترده ۴ متر



برج ۱۱۸ Merdeka PNB



برج Wuhan Greenland Center

۹) برج Wuhan Greenland Center (چین)

- ✓ ارتفاع ۶۳۶ متر، ۱۲۶ طبقه روی زمین و ۵ طبقه زیر زمین
- ✓ پروژه اجرا از ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۹
- ✓ منطقه با شتاب زلزله $g/0.30$ با دوره بازگشت ۴۷۵ سال
- ✓ سیستم باربر جانبی از هسته مرکزی بتنی و ستونهای مورب بسیار بزرگ از بتن و فولاد و خریای منحنی شکل



۱۰) برج Shanghai Tower (چین)

- ✓ ارتفاع ۶۳۲ متر، طبقه روی زمین و ۵ طبقه زیر زمین
- ✓ پروژه اجرا از ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵
- ✓ مقاومت بتن ۶۰، ۵۰ و ۷۰ مگاپاسکال
- ✓ منطقه با شتاب زلزله $g/40$
- ✓ پیروود اصلی سازه ۹/۱۳ ثانیه

برج Shanghai Tower

سیستم باربر جانبی برج Shanghai Tower

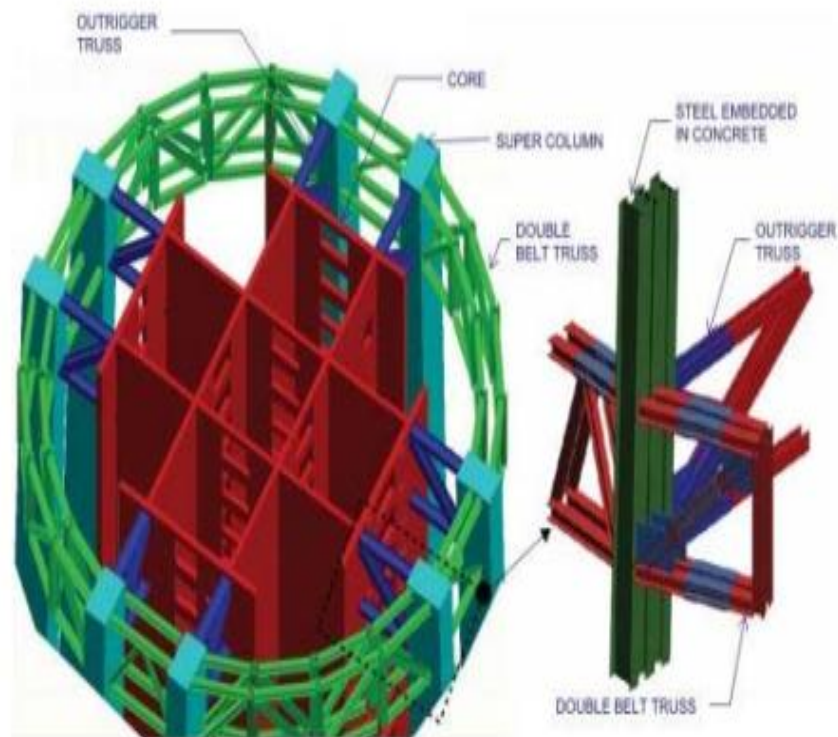
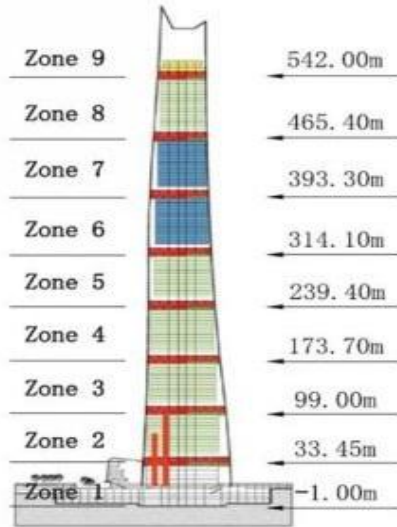
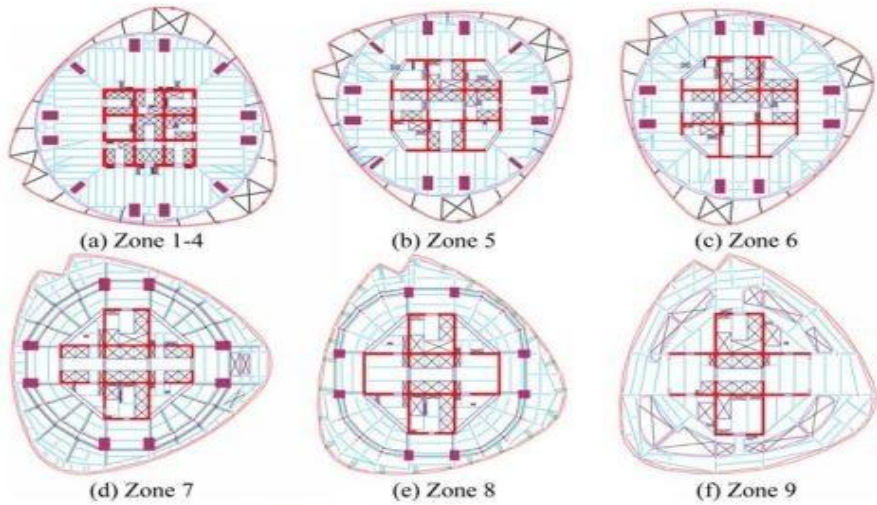


Figure 5. Mega frame for Shanghai Tower and outrigger detail

✓ سیستم باربر جانبی این سازه از یک هسته مرکزی بتنی، ستونهای بسیار بزرگ فولادی که در بتن مدفون شده است و خرپاهای مهاربازویی و کمربندی

سیستم باربر جانبی برج Shanghai Tower

مشخصات دیگر برج Shanghai Tower



پلان برج Shanghai Tower

✓ چرخش پلان سازه با افزایش ارتفاع

✓ در طبقات مختلف پلان متفاوت

✓ فونداسیون با ضخامت ۶/۱ متر

✓ ۹۵۵ شمع با قطر ۱ متر و طول ۳۰ متر

✓ مقاومت بتن شمع ۵۰ مگاپاسکال



برج Ping An Finance Center

(۱۱) برج Ping An Finance Center (چین)

✓ ارتفاع ۵۹۹ متر، ۱۱۵ طبقه روی زمین و ۴ طبقه زیر زمین

✓ پروژه اجرا از ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹

✓ سیستم باربر جانبی قاب مهار بندی عظیم و ۸ ستون بسیار

بزرگ و سیستم مهار بازویی و کمر بندی

✓ کل میلگرد های مصرفی ۶۳۰۰۰ تن

✓ کل فولاد مصرفی ۹۶۰۰۰ تن

✓ بتن دارای مقاومت ۶۰ و ۷۰ مگاپاسکال

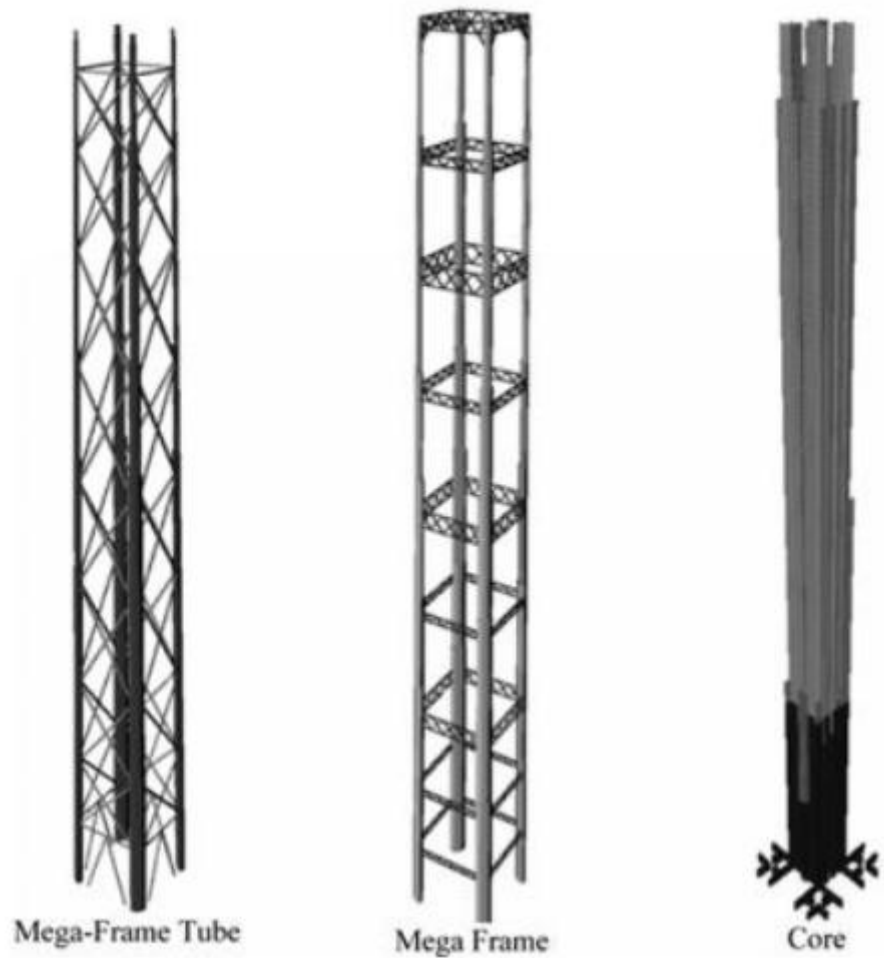
✓ مقاومت بتن شمع ۴۰ مگاپاسکال



برج ۱۱۷ Goldin Finance

(۱۲) برج ۱۱۷ Goldin Finance (چین)

- ✓ ارتفاع ۵۹۷ متر، ۱۲۸ طبقه روی زمین و ۴ طبقه زیر زمین
- ✓ پروژه اجرا از ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹
- ✓ سیستم باربر جانبی شامل یک هسته مرکزی و قاب مهاربند پیرامونی
- ✓ شتاب طرح لرزه ای $g/15$
- ✓ بتن دارای مقاومت ۴۰ تا ۷۰ مگاپاسکال



✓ اجزای تشکیل دهنده سیستم باربر جانبی

✓ هسته بتنی و قاب های مهاربندی شده

سیستم باربر جانبی برج ۱۱۷ Goldin Finance



برج One World Trade Center

۱۳) برج One World Trade Center (نیویورک)

- ✓ ارتفاع ۵۴۶ متر، ۹۴ طبقه روی زمین و ۴ طبقه زیر زمین
- ✓ پروژه اجرا از ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴
- ✓ سیستم باربر جانبی شامل یک هسته مرکزی و قاب مهاربند پیرامونی
- ✓ بتن دارای مقاومت ۵۰ تا ۸۰ مگاپاسکال



۱۴) برج Guangzhou CTF Finance Centre (چین)

- ✓ ارتفاع ۵۳۰ متر، ۹۴ طبقه روی زمین و ۴ طبقه زیر زمین
- ✓ پروژه اجرا از ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶
- ✓ سیستم باربر جانبی شامل یک هسته مرکزی، ستون های بزرگ، خرپای کمربندی و مهار بازویی
- ✓ بتن دارای مقاومت ۶۰ تا ۸۰ مگاپاسکال

برج Guangzhou CTF Finance Centre



برج Tianjin CTF Finance Centre

۱۵) برج Tianjin CTF Finance Centre (چین)

- ✓ ارتفاع ۵۳۰ متر، ۹۷ طبقه روی زمین و ۴ طبقه زیر زمین
- ✓ پروژه اجرا از ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰
- ✓ سیستم باربر جانبی شامل هسته داخل هسته به همراه ستون های مورب
- ✓ بتن دارای مقاومت ۶۰ تا ۸۰ مگاپاسکال
- ✓ پیروود مود اول ۸/۵۳ ثانیه

✓ ۵/۵ متر ضخامت فونداسیون

✓ ۴۳۴ شمع به قطر ۱ متر

✓ طول شمع ها ۱۰۰ متر

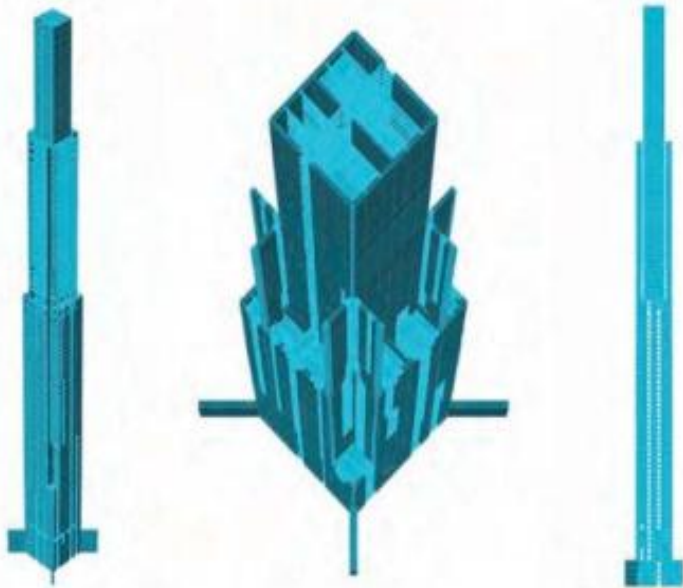


Figure 3. Stepped core-in-core system (Source: SOM)

图3 阶梯式筒中筒 (来源: SOM)

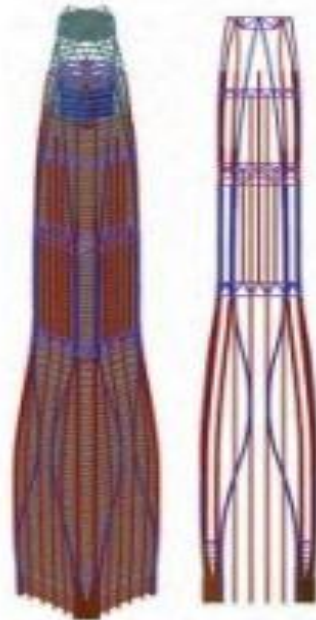


Figure 4. Sloped column system (Source: SOM)

图4 斜柱式筒中筒 (来源: SOM)

سیستم هسته در هسته

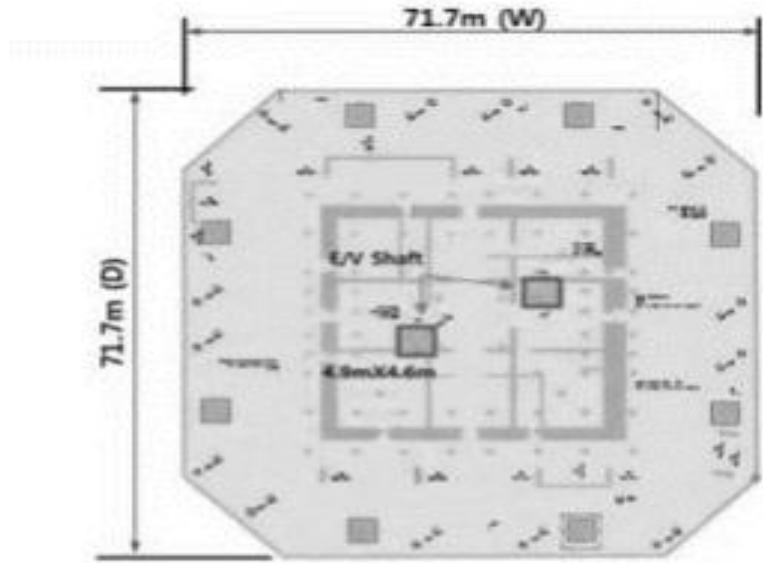
ستون های محیطی سازه



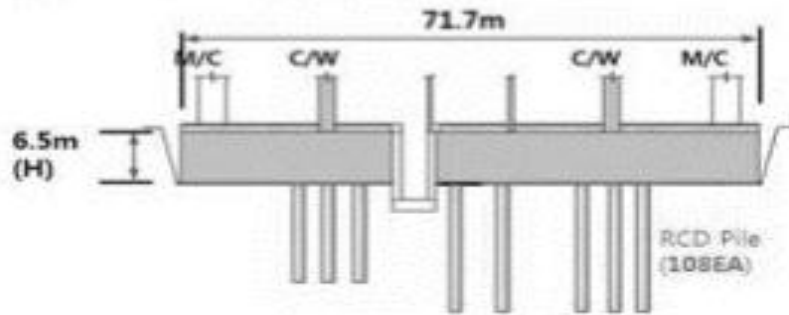
برج Lotte world

۱۶) برج Lotte world (کره)

- ✓ ارتفاع ۵۵۶ متر، ۱۲۳ طبقه روی زمین و ۶ طبقه زیر زمین
- ✓ پروژه اجرا از ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۷
- ✓ سیستم باربر جانبی شامل هسته مرکزی بتنی و خریای مهار بازویی و کمربندی در طبقات ۳۹ تا ۴۴ و ۷۲ تا ۷۶ و ۱۰۴ تا ۱۰۷
- ✓ بتن دارای مقاومت ۵۰ تا ۸۰ مگاپاسکال



○ Section of MAT foundation



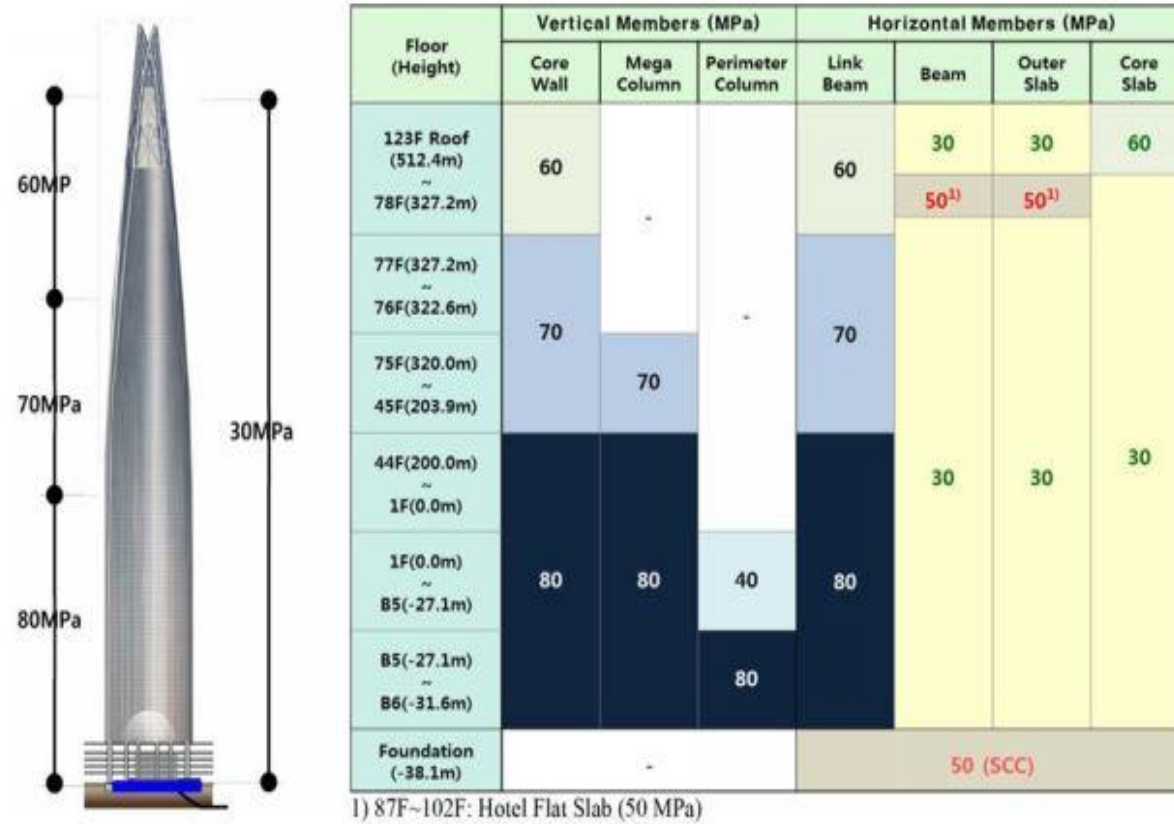
فونداسیون برج Lotte world

✓ ضخامت فونداسیون ۶/۵ متر

✓ تحمل بار قائم ۷۵۰۰۰ تن

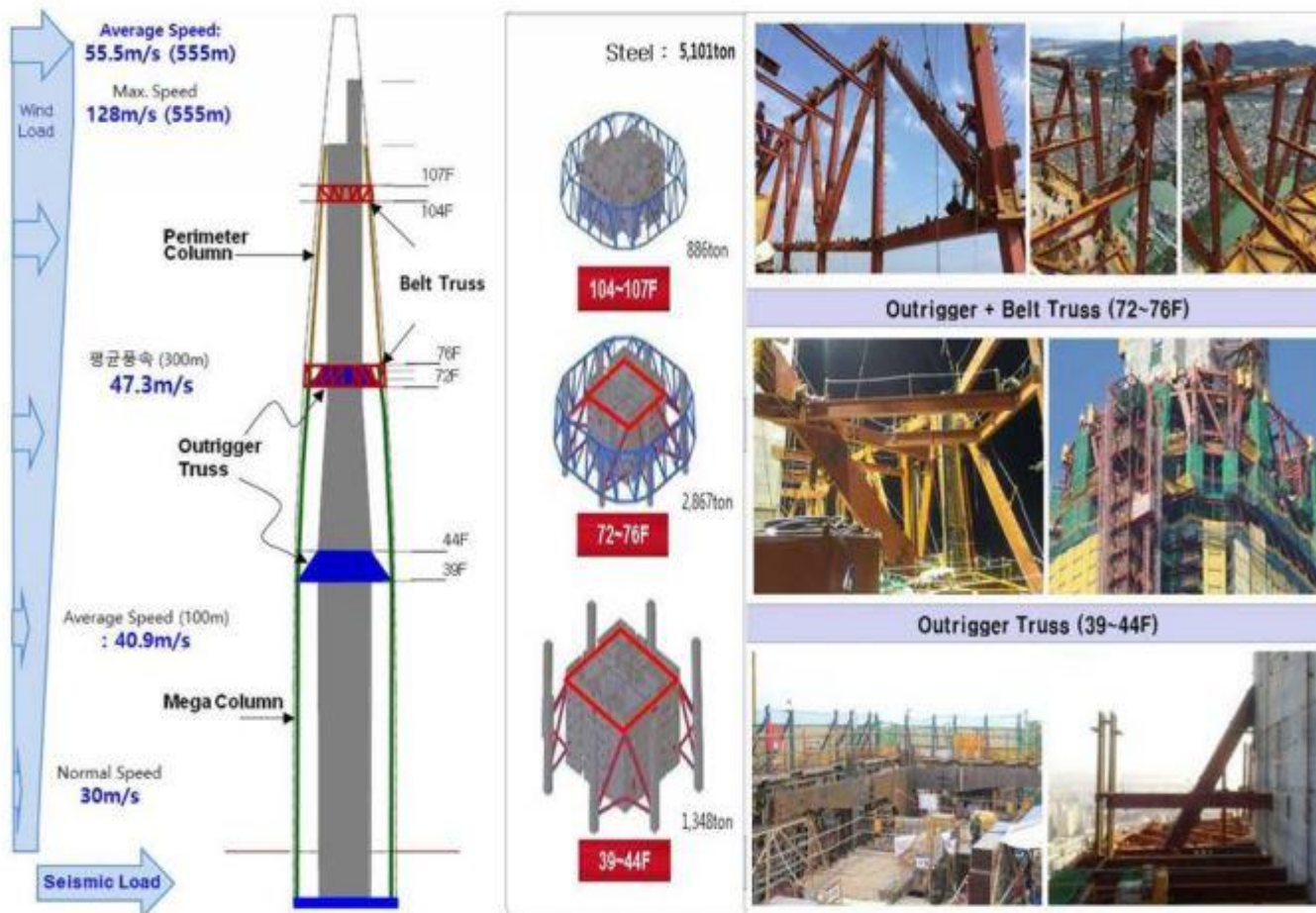
✓ مقاومت فشاری بتن فونداسیون ۵۰ مگاپاسکال

Table 1. Summary of High Strength Concrete in Lotte World Tower



✓ مقاومت فشاری بالا در بتن مورد استفاده

توزیع مقاومت فشاری بتن در ارتفاع



✓ سیستم باربر جانبی شامل خرپای
 مهار بازویی و خرپای کمربندی

سیستم باربر جانبی

ساختمان بلندی است که در مرحله پیشنهاد هستند

#	Building Name	City	Height (m)	Height (ft)	Floors	Material	Use
1	X-Seed 4000	Tokyo (JP)	4000	13,123	800		residential / hotel / office
2	Ultima Tower	San Francisco (US)	3218	10,558	500		residential
3	Dubai City Tower	Dubai (AE)	2400	7,874	400		residential / hotel / office
4	Hexahedron City	Scottsdale (US)	2101	6,893	200		
5	Houston Tower	Houston (US)	2092	6,864	500		residential / office
6	Try 2004	Tokyo (JP)	2005	6,578	400		residential / office
7	Aeropolis 2001	Tokyo (JP)	2001	6,565	500		residential / hotel / office
8	Al Hosaini Tower	Port Sudan (SD)	1750	5,741	-		multiple
9	Sky Mile Tower	Tokyo (JP)	1700	5,577	-	composite	residential
10	Houston Pinnacle	Houston (US)	1611	5,285	500		
11	The Illinois	Chicago (US)	1609.4	5,280	528	steel	residential / hotel / office / government
12	Mile High Tower	Jeddah (SA)	1609	5,279	-		multiple
13	New City Tower	London (GB)	1501	4,925	-		multiple
13	Pyramid-In-Pyramid	Singapore (SG)	1501	4,925	-		
15	Mother	Tokyo (JP)	1321	4,334	220		multiple
16	Bionic Tower	Hong Kong (CN)	1228	4,029	300		residential
16	Bionic Tower	Shanghai (CN)	1228	4,029	300		multiple
18	Orbita Residence	São Paulo (BR)	1112	3,648	265		
19	Azerbaijan Tower	Baku (AZ)	1050	3,445	189		multiple
20	Murjan Tower	Manama (BH)	1022	3,353	200		multiple
21	One Dubai Tower	Dubai (AE)	1008	3,307	201		

نتیجه گیری:

(۱) برای کاهش ابعاد ستون، استفاده از بتن با مقاومت بسیار بالا

(۲) استفاده از سیستم مهار جانبی مناسب جهت کنترل دررفت

(۳) سیستم های مرسوم مهاربندی شامل

❖ قاب های مهاربندی شده محیطی

❖ قابهای محیطی

❖ سیستم های قاب - دیوار

❖ سیستم مهاربندی کمربندی



- ۴) تمهیدات لازم جهت حمل و انتقال بتن
- ۵) جلوگیری از انسداد لوله انتقال بتن با انتخاب قطر لوله حداقل ۴ برابر بزرگترین سنگدانه
- ۶) استفاده از کند گیر کننده
- ۷) تامین قالب قوی به علت وجود بتن خودتراکم
- ۸) استفاده از شمع های متعدد برای انتقال نیرو و جلوگیری از واژگونی سازه
- ۹) انتخاب شکل پلان بهینه جهت جلوگیری از پیچش
- ۱۰) پیش بینی کوتاه شدگی اعضا

با تشکر از توجه شما