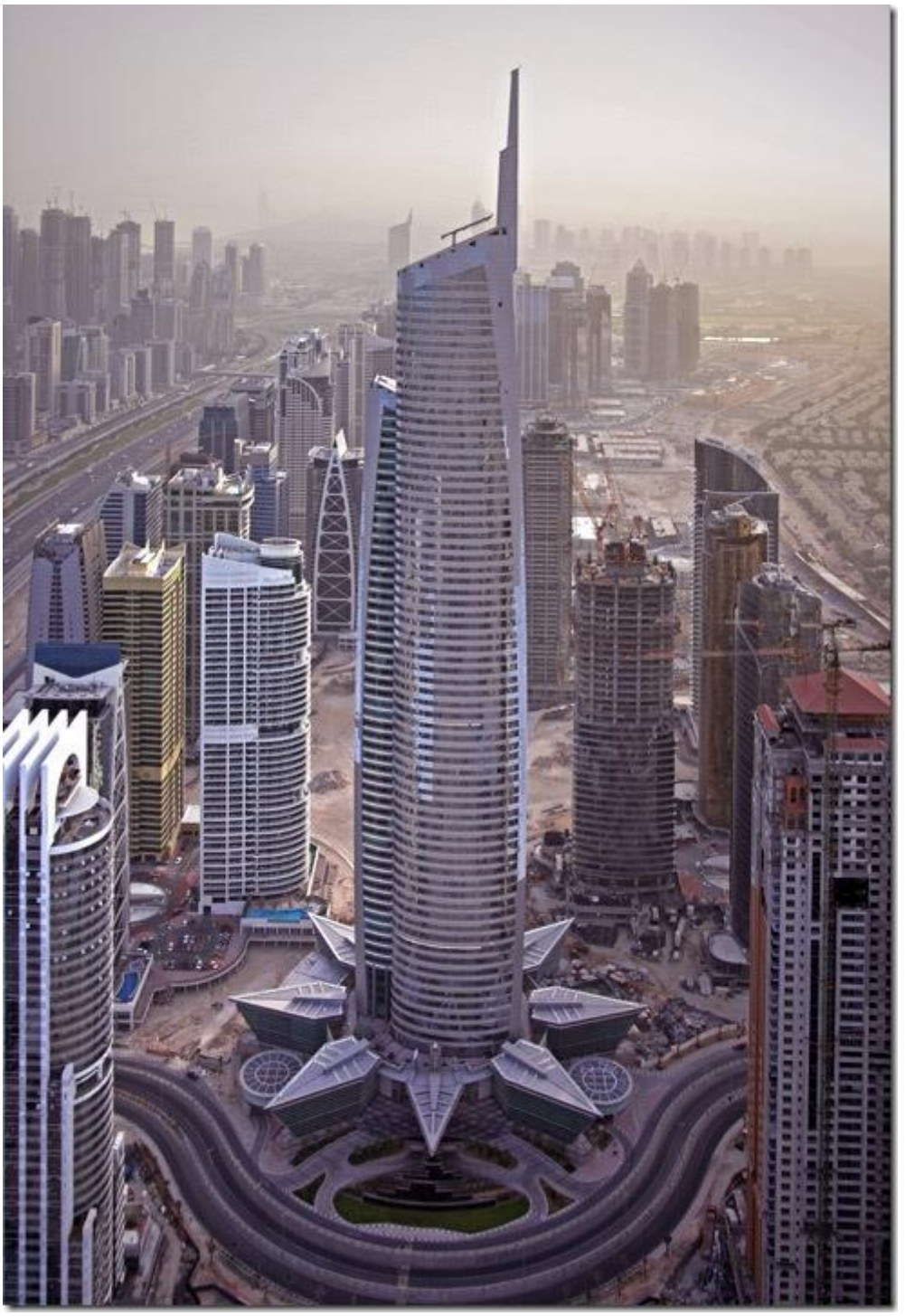
طراحی سازه‌ای برج الماس دوبی



برج الماس یک برج اداری با ارتفاع ۳۶۰ متر در دوبی می‌باشد. طراحی آن شامل دو برج بیضوی متقاطع است که روی یک سکوی دو طبقه قرار دارند. شکل معماری و نیازمندی‌های مشتریان در خصوص استفاده بهینه از کف، سبب مشکلات قابل‌توجهی برای تیم طراحی سازه شد. در این مقاله در خصوص اسکلت سازه‌ای، مطالعات صورت گرفته تونل-باد شامل

شتاب ساختمان، تغییر مکان‌های جانبی و اثرات کوتاه شدگی ستون و اقدامات کاهنده بحث می‌شود. هم‌چنین توضیحاتی در خصوص طرح دکل برج و میراگرهای جرمی تنظیم شده ارائه می‌شود.

معرفی

مرکز چند منظوره برج الماس دوبی با ارتفاع ۳۶۰ متر یک برج اداری بلند و باریک است که در مجموعه برج‌های دریاچه جمیرا در کشور امارات و شهر دوبی قرار گرفته است (شکل ۱). این برج شامل ۵ زیرزمین، دو طبقه سکو، ۶۰ طبقه اداری و ۳ طبقه مکانیکی می‌باشد. مساحت کلی آن برابر با ۸۵۰۰۰ متر مربع است.

پلان تیپ این برج به شکل دو بیضی متقاطع است که ورق کف در آن به طور تقریبی طولی برابر با ۶۴ متر و عرضی برابر با ۴۲ متر دارد (شکل ۲). پلان طبقات ۵۳ تا ۶۴ تنها از یک بیضی تشکیل شده است. دکل بلند و باریک این برج با ارتفاع ۸۱ متر بلندترین نقطه (۳۶۰ متر) این برج است.

فرآیند ساخت این برج در سپتامبر ۲۰۰۸ پایان یافت. *شورای بلندترین ساختمان‌ها* و *زیستگاه‌های شهری* (CTBUH)، این برج را دومین ساختمان بلند تمام شده جهان در آن سال معرفی کرد.

سیستم سازه‌ای:

عوامل زیر تأثیر به سزایی در طراحی سازه‌ای برج داشتند:

۱- فضای اداری نباید دارای بهره‌وری کمتر از ۸۰٪ باشد.

۲- فضای اداری باید انعطاف‌پذیر و بدون ستون باشد.

اسکلت سازه‌ای برج از سیستم لوله در لوله تشکیل شده است. این سیستم از یک قاب بیرونی بتن مسلح و یک دیوار هسته‌ای مرکزی تشکیل شده که این دو قسمت به واسطه یک تیر ستون فقراتی مرکزی در هر طبقه و به واسطه دیوارهای دارای بست در طبقات مکانیکی به هم متصل شده‌اند.

قاب محیطی از تیرهایی با عمق ۱۰۰۰ میلی‌متر و عرض ۵۰۰ میلی‌متر ساخته شده که دهانه این تیرها مطابق با ستون‌های خارجی می‌باشد. حداکثر فاصله ستون‌ها ۵ متر است. این ستون‌های بخشی از سیستم مقاوم جانبی را تشکیل می‌دهند. ستون‌ها به صورت ترکیبی طراحی شده‌اند به طوری که در نیمه پایینی ساختمان، سعی شده است سایز ستون‌ها نسبت به آنچه در یک ستون بتن مسلح به تنهایی مورد نیاز است، کم باشد (شکل ۳).

دال طبقات تیپ از پانل‌های پیش ساخته با هسته توخالی و ضخامت ۳۲۰ میلی‌متر و ضخامت سازه‌ای ۸۰ میلی‌متری در قسمت فوقانی تشکیل شده است. دال قاب خارجی را به هسته بتنی دیوارها یا تیرهای ستون فقراتی مرکزی متصل می‌کند. کف به صورتی طراحی شده که به عنوان یک دیافراگم، نیروهای لرزه‌ای و جانبی باد را به هسته مرکزی و قاب خارجی انتقال می‌دهد.

پارامترها	دیوار هسته‌ای	دیوار هسته‌ای + قاب خارجی	دیوار هسته‌ای+قاب خارجی+دیوارهای نواری+دیوارهای دارای بست
پریود طبیعی:S	۱۴,۶	۱۲,۲	۹,۶
تغییر مکان جانبی باد: mm ۵۰y	۱۷۸۵	۱۲۵۸	۷۷۱

جدول ۱- آنالیز پارامتری اثرپذیری سیستم سازه‌ای

دال پیش ساخته به این دلیل انتخاب شد که نسبتاً سبک است و فضایی مناسب برای خدمات فراهم می‌کنند.

شکل ۱-برج الماس ۳۶۰ متری دوبی-UAE سال ۲۰۰۸

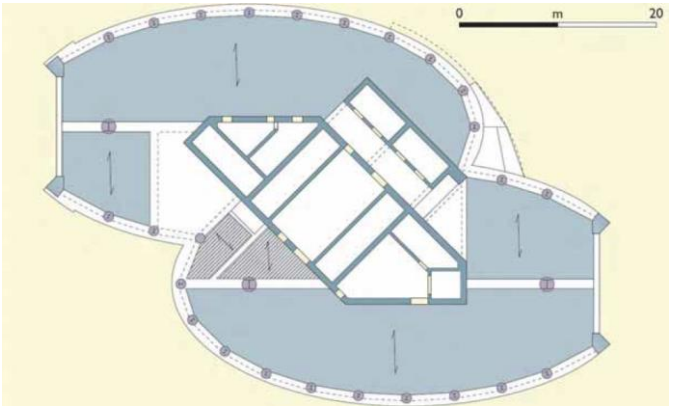
مدل‌سازی المان محدود

مدل سه بعدی المان محدود برج و سکو در Etabs تعریف شد که شامل دال گسترده قرار گرفته روی تکیه‌گاه‌های فنری برای شبیه سازی شمع‌ها بود. این در حالی است وزن گسترده در ارزیابی لرزه‌ای برش پایه در نظر گرفته نشد. فرض شده است که همه بارها از طریق شمع‌ها به زمین منتقل می‌شوند.

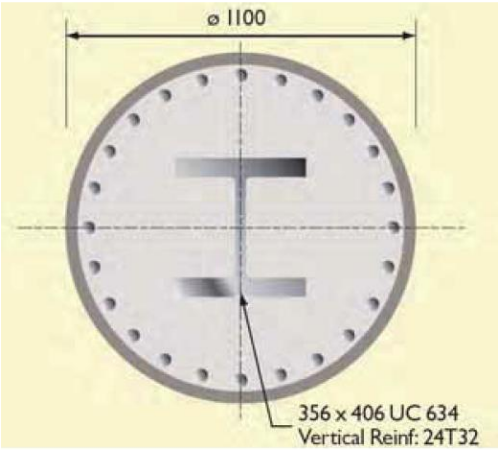
سختی فنر شمع‌ها مبتنی بر ظرفیت باربری و نشست تئوری آن‌ها تحت بارگذاری در نظر گرفته شده بود که این دو مورد از طریق ارزیابی‌های ژئوتکنیکی به دست می‌آید. اثر سکو بر تغییر مکان جانبی با مدل‌سازی فنرهای جانبی در ترازهای مختلف و بر اساس سختی سکو در نظر گرفته شد.

دیوارهای دارای بست دارای بازشوهای بزرگی برای تهویه هوا و لوله گذاری می‌باشند (شکل ۴).

دیوارهای دارای بست بارهای مرده قابل‌توجهی را از ستون‌های خارجی به هسته منتقل می‌کنند. علاوه براین، این دیوارها نیروها را به دلیل کوتاه شدگی محوری مختلف بین هسته و قاب خارجی جذب می‌کنند.



شکل ۲

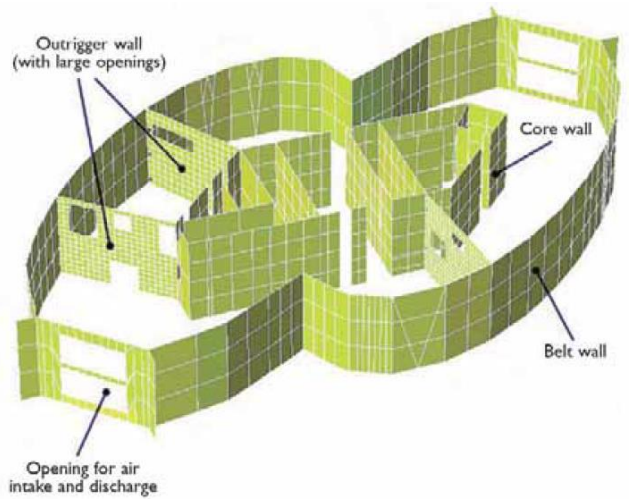


شکل ۳- مقطع یک ستون کامپوزیت معمولی (ابعاد به میلی‌متر)

مهندسی باد

آزمایش تونل باد با استفاده از مدل تعادل نیرو با فرکانس بالا (شکل ۵) و بارهای باد بر اساس تندباد ۳s و سرعت ۳۷,۷ متر بر ثانیه برای مناطق باز و بدون مانع در ارتفاع ۱۰ متر، مطابق با اقدامات فرودگاه بین‌المللی دوبی بین سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۹۷ انجام شد. این مدل تا شعاع ۵۷۵ متر را شامل می‌شد.

مدل بر روی یک صفحه گردان قرار گرفت و در فواصل ۱۵ درجه‌ای چرخانده شد تا نیروهای باد در ۲۴ جهت تعیین شود. مشخصات ساز ای مانند جرم، توزیع جرم، حالات مود و فرکانس‌ها از مدل تحلیل‌های سازه‌ای و ورودی‌های ارزیابی کل نیروهای سازه‌ای، شتاب ساختمان و فشار پوشش‌های فلزی به دست آمدند. در محاسبات نسبت میرایی ۲ درصد فرض شد. آزمایشات با استفاده از ۲۴ ترکیب بار در مواجه با اثرات جهتی برای هر بخش فراهم آمدند.



شکل ۴- خلاصه مدل المان محدود سه بعدی پلان شامل دیوارهای هسته‌ای، دیوارهای دارای بست، بازشوها و دیوارهای تسمه‌ای خارجی

طراحی لرزه‌ای

بارهای لرزه‌ای بر اساس UBC-۹۷ و در نظر داشتن منطقه ۲A تعیین شدند. تحلیل طیف پاسخ بر اساس UBC-۹۷ با ضرایب مناسب برای محاسبه نیروهای عضو و تغییر مکان‌های مربوطه صورت گرفت.

ضرایبی طبق UBC-۹۷ برای تعدیل در طراحی اعمال شد که این مقادیر برای دیوارها و ستون‌های ترک نخورده ۰,۷ و برای دیوارهای ترک خورده ۰,۳۵ و برای تیرها ۰,۳۵ بود. جزئیات شکل پذیری برای تیرهای جفتی با استفاده از آرماتورگذاری مورب مطابق باUBC-۹۷ مشخص شد، اگرچه این کار برای منطقه ۲A لزومی نداشت.

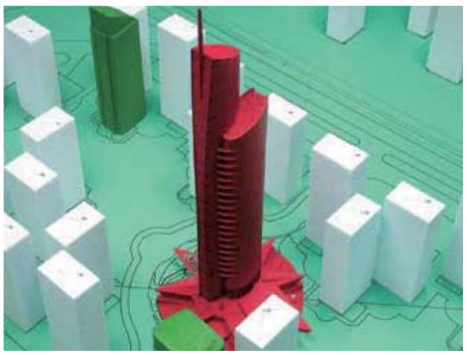
سیستم فونداسیون

فونداسیون این برج متشکل از نوعی فونداسیون شمعی به ضخامت ۳ متر است که پشتیبانی آن از طریق شمع‌های اصطکاکی با قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع حدود ۴۰ متر صورت می‌گرفت. برای کاهش اثر ناشی از گرمای هیدراسیون، ۵۰٪ از مقدار سیمان با سرباره کوره بلند (ggbs) جایگزین شد. فونداسیون و اطراف دیوارهای حائل با پوشش بتنی مناسبی پوشانده شد. ستون‌ها و دیوارهای محوطه سکو توسط دال‌هایی که دهانه آن‌ها مطابق با فاصله بین سر شمع‌ها است، پشتیبانی می‌شود. برای کاهش ضخامت دال، شمع‌های کششی به گونه‌ای طراحی شدند که در برابر پدیده آپلیفت (بلند شدگی) ناشی از بالا بودن سطح آب در سکوها مقاومت کنند.

عدم تقارن عمودی

به دلیل این که بخشی از برج که شامل ۱۲ طبقه است روی قسمت‌های دیگر گسترش یافته است، برج دارای نامتقارنی عمودی است. این بخش از برج به هسته‌ای که در کل ارتفاع سازه وجود دارد، متصل می‌شود. در اوایل فاز طراحی مشخص شد که ممکن است تغییر مکان جانبی در ساختمان اتفاق بیفتد که فراتر از مقدار آن در یک سازه متقارن است.

کنترل تغییر مکان ساختمان به طراحان سازه این امکان را می‌دهد که تغییر مکان‌های واقعی را با مقادیر تخمین زده شده مقایسه کند. این برآورد توسط ابزار کنترل لیزری (Leica TPS۷۰۰) انجام می‌شود.



شکل ۵ – مدل برج الماس به کار رفته در مطالعات تونل باد

معیار ISO: milli-g	شتاب کل اوج: milli-g	دوره بازگشت: y
۱۴	۱۲,۱	۱
۱۹,۵	۱۶,۷	۵
۲۳,۴*	۱۸,۷	۱۰
*معیار برای دوره بازگشت ۱۰ ساله در ISO فراهم شده و درون‌یابی شدند		

جدول ۲- شتاب پیش بینی شده ساختمان

نتایج ناشی از تحلیل مدل سه بعدی نشان داد که تغییر مکان جانبی افقی ناشی از نیروی گرانشی در بالاترین تراز طبقه، ۲۲۵ میلی‌متر خواهد بود (کوتاه مدت).

این مقدار نتیجه برآوردی دست بالاست، زیرا در مدل فرض شده است که پس از ساخت سازه بلافاصله همه بارها اعمال می‌شوند که در حقیقت این گونه نیست و لازم است که بررسی‌های بیشتری انجام شود. علاوه براین، واقعیت‌های زیر در تحلیل مدل مدنظر قرار نگرفته است.:

۱- همه طبقات به صورت افقی در نقشه‌های طراحی نشان داده شده‌اند، در نتیجه کاهش کوتاه شدگی متفاوت در تحلیل مدل محاسبه شده است.

۲- عناصر عمودی به صورت قائم و مطابق با بنچمارک ثابت در سطح زمین ساخته می‌شوند، در نتیجه کاهش تغییر مکان جانبی در تحلیل مدل محاسبه شده است.

۳- اثرات عوامل وابسته به زمان مانند خزش، انقباض و سن بتن

۴- مدول الاستیسیته به دست آمده برای بتن معمولاً ۳۰٪ بالاتر از میزان تعیین شده می‌باشد.

۵- مقاومت فشاری بتن به دست آمده به طور معمول ۱۰٪ بیشتر از میزان تعیین شده می‌باشد.

تغییر مکان جانبی بار مرده درازمدت

از آن جایی که تغییر مکان جانبی ناشی از بار مرده به اندازه H/۱۰۰ قابل قبول تلقی خواهد شد، ارزیابی‌های بیشتری باید برای رسیدن به برآورد بهتر تغییر مکان جانبی ناشی از بار گرانشی انجام شود.

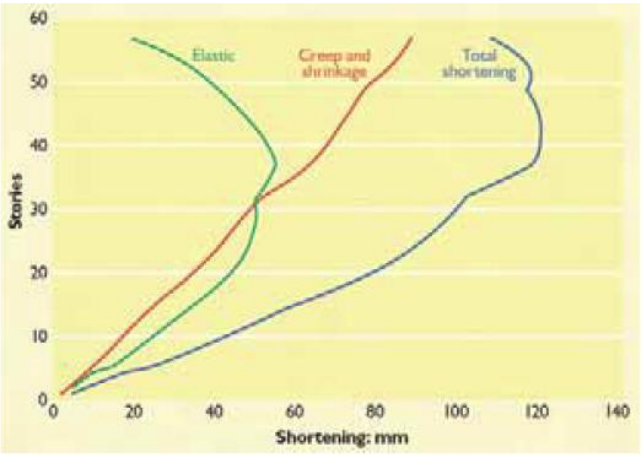
رویه زیر برای برآورد تغییر مکان جانبی ناشی از بار مرده طی می‌شود.

تحلیل تغییر مکان جانبی با استفاده از مدل کامل ساختمان و تحلیل‌های متوالی از ارتفاع ۲۳۶+ متر تا ارتفاع ۲۷۹+ متر انجام شد. با آنالیز مراحل ساخت اجراشده از ترازهای ۲۳۶ متر تا ۲۷۹ متر صورت گرفت. تغییر مکان جانبی لحظه‌ای ناشی از بار مرده در تراز ۲۳۶+ متر، ۱۵۰ میلی‌متر و در بالاترین طبقه (۲۷۹ متر) ۲۲۵ میلی‌متر بود.

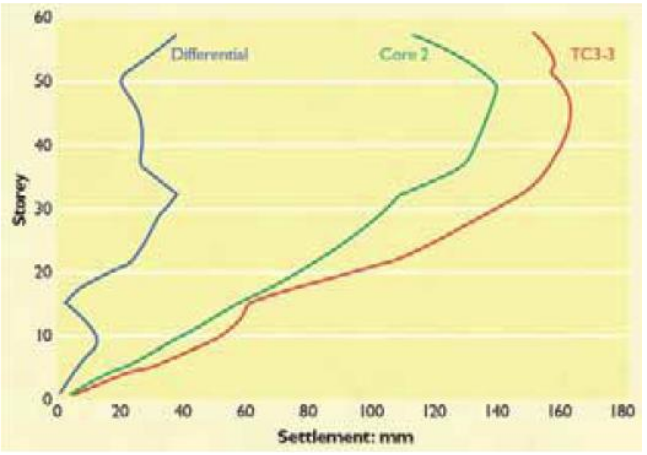
اثر خزش برای کاهش در مدول الاستیسیته مؤثر مجاز واقع شد. محاسبات بر اساس اصل لنگر سطح صورت گرفت تا ضریب افزایشی برای تغییر مکان‌های جانبی در نظر گرفته شده باشد. این کار منجر به افزایش ۱۱۰ درصدی مقادیر محاسبه شده برای تغییر مکان جانبی ناشی از بار در ارتفاع ۲۳۶+ و بالاتر شد.

با اعمال ۱،۱ به عنوان ضریب خزش، تغییر شکل‌های دراز مدت به میزان ۴۷۲ میلی‌متر (H/۵۹۰) در تراز ۲۷۹ متر و ۳۱۵ میلی‌متر (H/۷۵۰) در تراز ۲۳۶ متر به دست آمدند.

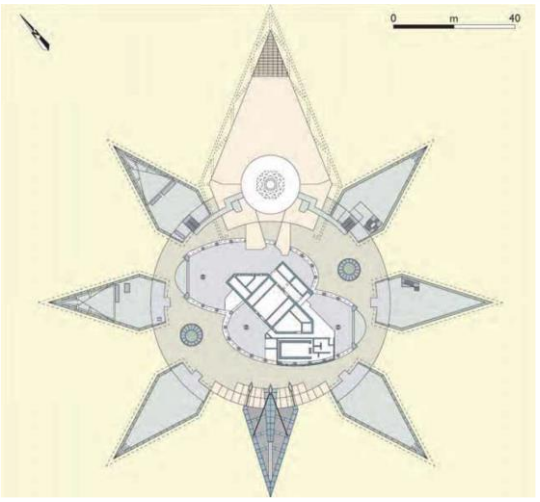
درنتیجه محاسبه مقادیر تغییر مکان جانبی‌های دراز مدت مبتنی بر ویژگی‌های تعیین شده مصالح، دیوارهای هسته‌ای در قسمت‌های بلندتر ساختمان ضخیم‌تر شدند.



شکل ۶ - منحنی نشست درازمدت برای کوتاه شدگی الاستیک، خزش و انقباض همراه با کوتاه شدگی کل در ستون معمولی



شکل ۷- نشست یک ستون برج (TC-۳) و دیوار هسته‌ای به همراه نشست متفاوت بین دو ستون معمولی و هسته



شکل ۸- پلان سکو

نتایج آزمایش مصالح واقعی از محل نشان داد که میزان مدول الاستیسیته به کار رفته حدود ۳۵ درصد بیشتر از میزان تعیین شده و مقادیر مقاومت فشاری بتن حدود ۱۰ درصد بیشتر از مقاومت طراحی بود. با در نظرگرفتن این عوامل، تغییر شکل‌های درازمدت در آخرین طبقه حدود ۱۸۹ میلی‌متر (H/۱۴۷۰) در ارتفاع ۲۷۹ متر و ۱۲۶ میلی‌متر (H/۱۹۰۰) در تراز ۲۳۶ متر بود. این مقادیر به درستی بین بازه مورد قبول H/۱۰۰۰ می‌باشند.

اگرچه تحلیل نشان می‌دهد که در تئوری، تغییر مکان جانبی باید بین محدوده قابل قبول باشد، اما پیمانکار عمود بودن ساختمان را حین ساخت بررسی کرد.

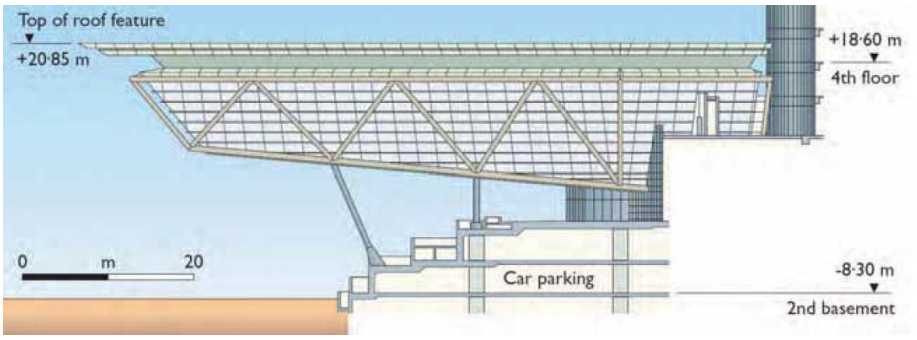
تغییر مکان جانبی جانبی گزارش شده در محل تاوَن پس از اتمام آخرین سقف ۵۵ میلی‌متر (H/۵۰۷۰) در تراز ۲۷۹ متر و ۵۳ میلی‌متر (H/۴۴۵۰) در تراز ۲۳۶ متر بود. اقدامات انجام شده نشان داد که با تکنیک‌های ساده می‌توان تغییر مکان جانبی جانبی ناشی از بار مرده را تا مقدار زیادی کنترل کرد.

تغییر شکل محوری درازمدت و کوتاه شدگی

مانند همه ساختمان‌های بلند، برآورد تغییر شکل محوری درازمدت (شکل ۷) و کوتاه شدگی بین هسته و ستون‌ها (شکل ۷) ضروری می‌باشد. این تغییر شکل روی طراحی عناصر اتصال تأثیر می‌گذارد. همچنین نیاز است که از افقی بودن سقف و کف هنگام اجرا اطمینان حاصل شود.

دو رویکرد بدین منظور در نظر گرفته شد- اولی استفاده از Eurocode ۲[۳] و دیگری استفاده از مدل مؤسسه بتن آمریکا ۲۰۹.

در روش Eurocode وارفتگی خزش ناشی از حضور آرماتور در نظر گرفته نمی‌شود، در حالی که در مدل ACI این مسئله در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۹- ارتفاع چشم انداز سکوی آبشاری آویزان مرکز الماس

این مسئله یک عامل بالقوه در ملاحظات مربوط به این ساختمان است که ستون‌ها در آن کامپوزیت هستند و شامل مقادیر قابل‌توجهی آرماتورگذاری است و دیوارها در ترازهای پایین‌تر به شدت تقویت شده‌اند.

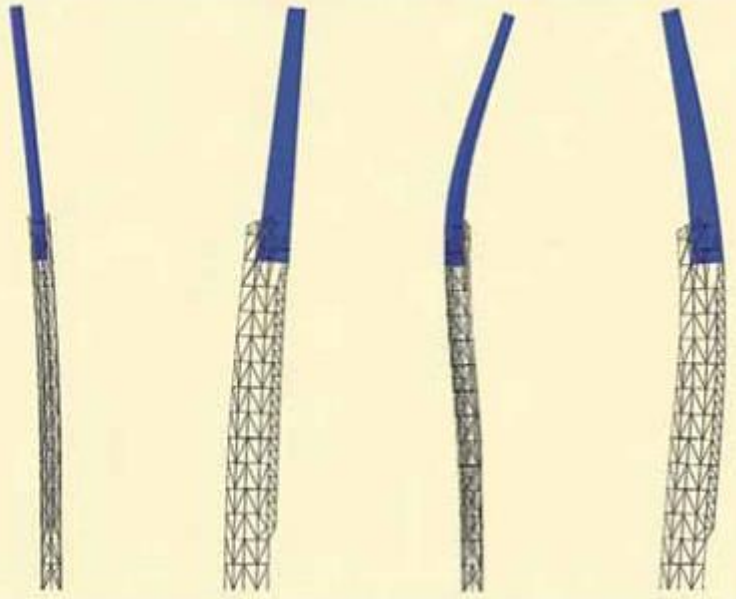
برنامه، کوتاه شدگی محوری درازمدت ستون‌ها و دیوارها را با در نظر گرفتن کوتاه شدگی الاستیک، خزش، انقباض و با مجاز دانستن این حقیقت که سقف‌ها در موقعیت نشان داده شده در نقشه‌ها قرار دارند؛ ارزیابی کرد. محاسبات برای دیوارهای هسته‌ای و ستون‌ها صورت گرفت. یک اختلاف معمولی بین دیوارهای هسته‌ای و یک ستون در شکل ۸ نشان داده شده است.

شکل ۱۰

روکش کاری

نمای خارجی ساختمان شامل روکش و سیستم دیوار پرده‌ای است که از ترکیب آلومینیوم، شیشه و عایق ساخته شده است فاصله عمودی کف تا کف ۴ متر است، در حالی که فاصله افقی مبتنی بر ترکیب شبکه سازه‌ای و عرض دفاتر اداری برای داشتن حداکثر دهانه است. یک فاصله ۱۰ میلی‌متری بین هر دو پانل ایجاد شد تا تغییر مکان‌های لرزه‌ای و حرارتی و همچنین تغییر مکان قاب بتنی ناشی از خزش و انقباض ممکن شود.

پارامترها	مود ۱ (محور فرعی)	مود ۱ (محور اصلی)	مود ۲ (محور فرعی)	مود ۲ (محور اصلی)
فرکانس پیش بینی شده: Hz	۰,۶۴	۰,۷۰	۲,۴۷	۲,۸۷
فرکانس محاسبه شده: Hz	۰,۵۱	۰,۷۰	۲,۲۰	۲,۷۰

Parameters	Mode 1 (minor axis)	Mode 1 (major axis)	Mode 2 (minor axis)	Mode 2 (major axis)
Frequency predicted: Hz	0·64	0·70	2·47	2·87
Frequency measured: Hz	0·51	0·70	2·20	2·70
Mode shape				
Required damping	3%	3%	2%	2%
Achieved damping	4%	4%	>5%	>5%

جدول ۳ – عملکرد دینامیکی دکل مارپیچ

سکو

طراحی سکو از هندسه ذاتی زاویه دار یک الماس الهام گرفته شده بود. سکو از ۸ گلبرگ شیشه‌ای مثلث گونه تشکیل شده است (شکل ۸).

سازه مارپیچ

بالای برج الماس یک دکل بلند به ارتفاع ۸۱ متر وجود دارد که سر آن بلندترین نقطه برج یعنی ارتفاع ۳۶۰ متری است. پایه این دکل به واسطه بک دیوار بتن مسلح با طول بیش از ۲۱ متر به برج متصل است. این دکل با در نظر گرفتن نیروهای استاتیکی باد طراحی شده است.

بادهای غیر قابل پیش بینی طی نصب می‌توانست منجر به فروریزش و یا گسیختگی دکل شود به همین منظور از یک دستگاه متوقف کننده گردباد و تند باد در طی دوره نصب و تا زمان فعال شدن میراگرها استفاده شد (شکل ۱۰). این دستگاه باعث آشفتگی در وزش باد می‌شد و به این صورت از تغییر مکان‌های زیاد در دکل جلوگیری می‌کرد.

مترجم: سارا محمدپور