



ارائه شده توسط:

سایت ترجمه فا

مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده

از نشریات معتبر

ارزیابی رفتار و پاسخ سازه ای برج خلیفه: چکیده ای از برنامه های پایش

سلامت سازه ای تمام مقیاس

چکیده

نسل جدید از سیستم های ساختمانی بلند و پیچیده امروزه معرفی می شوند که بیانگر جدید ترین پیشرفت ها در مصالح، طراحی، پایداری، ساخت و ساز و فناوری های اطلاعات IT می باشند. اگرچه پیچیدگی طراحی را می توان با پیشرفت و دسترسی به ابزار های تحلیل سازه ای و نرم افزار های پیشرفته جبران کرد، طراحی این ساختمان ها هنوز منوط به حداقل نیازمند های قانونی هستند که بایستی در یک مقیاس عظیم ارزیابی شوند. فعالیت نویسنده این مقاله در طراحی و برنامه ریزی ساخت برج خلیفه از زمان آغاز تا اتمان آن، موجب شد تا نویسنده به طور مفهومی اقدام به انجام یک مطالعه گسترده و برنامه نظارت بهداشت سازه ای زمان واقعی برای ارزیابی همه فرضیات ساختاری برای طراحی و برنامه ریزی ساخت برج کند.

پروژه برج خلیفه، بلند ترین سازه ای است که تاکنون توسط بشر ساخته شده است. بلندی این برج 828 متر بوده و متشکل از 162 طبقه و زیر زمین سه طبقه است. تلفیق اولیه شکل آئرو دینامیک و مهندسی باد، نقش مهمی در معماری و طراحی این برج چند منظوره ایفا کرده است که در آن کاهش اثرات دینامیکی باد، یکی از مهم ترین معیار های طراحی در آغاز طراحی پروژه بود. آگاهی از رفتار های سیستم فونداسیون و سازه ای برج، از عوامل اصلی در توسعه و اجرای مطالعه پیشرفته و برنامه های نظارت سلامتی سازه ای بود. از این روی، هدف این مقاله، بحث در مورد اجرای نظر سنجی و برنامه های نظارت سلامت سازه ای برای تایید پاسخ رفتاری سازه ای برج طی مرحله ساخت و طی عمر مفید آن می باشد. برنامه نظارت شامل 1- نظارت و پایش سیستم فونداسیون و پی برج 2- نظارت و پایش نشست پی، 3- اندازه گیری کرنش های عناصر عمودی برج 4- اندازه گیری کوتاه شدگی دیواره و ستون ناشی از اثرات الاستیک، و خزش 5- اندازه گیری جا به جایی جانبی برج تحت بار گرانش (از جمله اثرات غیر متقارن) ناشی از اثرات الاستیک کوتاه مدت و خزش بلند مدت 6- اندازه گیری جا به جایی های جانبی ساختمان و خصوصیات دینامیک در زمان واقعی طی ساخت و ساز 7- اندازه گیری جا به جایی های ساختمان، شتاب ها، خصوصیات دینامیکی، و رفتار سازه ای تحت شرایط دایم 8- پایش رفتار دینامیکی اوج و

خصوصیات خستگی. این برنامه اجرایی SHM منجر به افزایش اطلاعات در زمینه پاسخ سازه ای برج شده و امکان کنترل فرایند ساخت، ارزیابی پاسخ سازه ای به شکلی فوری و موثر و همبستگی فوری بین رفتار اندازه گیری شده و پیش بینی شده را داده است.

برنامه پیش سلامت سازه ای ارایه شده برای برج خلیفه بدون شک، پیش گام در استفاده از روش های پیمایشی و اجرای مفاهیم برنامه های جدید SHM به صورت بخشی از طرح اولیه سازه های ساختمانی است. به علاوه این برنامه های پایشی، به عنوان مدل توسعه برنامه های SJM برای نسل آینده محسوب می شوند با این تفاوت که فناوری ها و ابزارهای آن ها پیشرفته بوده و این برنامه ها می توانند برای یک برج بلند و پیچیده دیگر طراحی شود که اکنون تحت ساخت است.

1- مقدمه

پروژه برج خلیفه، بلند ترین سازه ای است که تاکنون توسط بشر ساخته شده است. بلندی این برج 828 متر بوده و متشکل از 162 طبقه و زیر زمین سه طبقه است. تلفیق اولیه شکل آئروپنایمیک و مهندسی باد، نقش مهمی در معماری و طراحی این برج چند منظوره ایفا کرده است که در آن کاهش اثرات دینامیکی باد، یکی از مهم ترین معیار های طراحی در آغاز طراحی پروژه بود. آگاهی از رفتار های سیستم فونداسیون و سازه ای برج، از عوامل اصلی در توسعه و اجرای مطالعه پیشرفته و برنامه های نظارت سلامتی سازه ای بود. از این روی، هدف این مقاله، بحث در مورد اجرای نظر سنجی و برنامه های نظارت سلامت سازه برای تایید پاسخ رفتاری سازه ای برج طی مرحله ساخت و طی عمر مفید آن می باشد. بیشتر مقاومت در برابر واژگونی برج عمدتاً توسط بار جاذبه خود برج مدیریت و کنترل می شود. به علاوه، همه اعضای عمودی به بار های گرانشی با فشار مساوی برای غلبه بر مسائل کوتاه شدن ستون که برای مدیریت در آسمان خراش ها سخت است مقاوم می باشند.

سازه برج خلیفه، طوری طراحی شده است که همانند یک ستون گول پیکر با شکل مقطعی رفتار می کند که منعکس کننده پروفیل و وزن ساختمان است. داستان انتخاب سیستم سازه ای و بهینه سازی سیستم سازه ای جدید بوده و در این جا به طور مفصل بررسی نشده است/ این مقاله موارد زیر را بررسی می کند 1- مروری بر مسائل کلیدی که منجر به انتخاب سیستم سازه ای و مسائل کلیدی مطرح شده در تلفیق مفاهیم طراحی سازه ای در مفهوم طراحی معماری می شود. 2- درک دقیق رفتار های سیستم پی و سازه کل برج که برای توسعه

برنامه های پایش سلامت سازه ای برج مناسب است 3- توصیف دقیق SHM و برنامه های پایشی مورد استفاده برای برج خلیفه

توسعه برنامه نظارتی و پایشی برای برج خلیفه، در زمان تاسیس و نصب سیستم، یکی از جامع ترین برنامه های پایش سلامتی در تاریخ احداث ساختمان های آسمان خراش است که رفتار های سازه ای و پاسخ برج را طی ساخت و در طول عمر مفید پایش می کند. و شامل موارد زیر است

پایش ستون های بتونی مسلح و انتشار بار آن ها در خاک

نظر سنجی و پایش قرار گیری پی، دیواره مرکزی و کوتاه شدگی عمودی ستون و جا به جایی های جانبی برج ناشی از شکل هندسی غیر متقارن و تقارن ساختاری سیستم

پایش فشار و کرنش های عناصر عمودی ناشی از اثرات بار گرانش

نصب برنامه پایش زمان واقعی موقت برای پایش جا به جایی ساختمان و پاسخ دینامیکی تحت بار های جانبی طی ساخت و ساز

نصب برنامه پایش زمان واقعی دائم برای پایش جا به جایی ساختمان و پاسخ دینامیک تحت بار های جانبی (باد و زلزله). هدف این برنامه پایش، تایید خصوصیات دینامیکی واقعی و پاسخ ساختمان از جمله حالت طبیعی ارتعاش، برآورد میرایی، اندازه گیری جا به جایی ساختمان و شتاب، تشخیص فوری تغییر در رفتار ساختاری، شناسایی پتانسیل خستگی در عناصر ساختاری حساس به خستگی در ارایه بازخورد های زمان واقعی در مورد عملکرد سازه ساختمانی و کمک فوری به عملیات روزمره می باشد.

ارایه داده های کافی برای پایش بینی رفتار ساختگی راس تحت زلزله یا باد پایین/متوسط و شدید

پایش پروفیل سرعت باد در امتداد ارتفاع ساختمان در شهر و مناطق نیمه باز با در نظر گرفتن مقیاس پروژه نسبت به اطراف



شکل 1

همبستگی پاسخ های اندازه گیری شده ساختمان با رفتار پیش بینی شده برج

این مطالعه و برنامه نظارت سلامتی سازه، از زمان شروع خود، منجر به بازخورد های گسترده و اطلاعات زیادی در مورد خواص مصالح واقعی، رفتار سازه ای برج و پاسخ برج تحت اثرات باد و زلزله و تغییرات پیوسته در خصوصیات ساختمان طی ساخت و ساز شده است. به علاوه و از همه مهم تر، برنامه SHM، یک بازخورد پیوسته را در مورد عملکرد سازه و سیستم های ساختمانی دیگر در زمان واقعی برای کمک به عملیات روز مره فراهم کرده است. مقایسه بین پاسخ های اندازه گیری شده و رفتار پیش بینی شده برج بحث خواهد شد.

2- توصیف مختصری از سیستم سازه ای

2-1 اطلاعات عمومی

پروژه برج خلیفه، یک برج چند منظوره با زیر بنای 460000 متر مربع بوده و شامل بخش های مسکونی، هتل، تجاری، اداری، سر گرمی، فروشگاه، تفریح و پارکینگ است. برج خلیفه از قبل پیش بینی می شد که 828 متر و بیش از 160 طبقه باشد.

طرح برج خلیفه بر گرفته از اشکال هندسی گل بیابانی است که بومی منطقه است و یک سیستم الگو در معماری اسلامی است. شکل برج حول یک مرکز اصلی با سه بال سازمان دهی شده است. هر بال، متشکل از چهار برآمدگی می باشد. هر هفت طبقه، یک برآمدگی بیرونی به صورت ساختار مارپیچی به طرف آسمان کشیده شده است. برخلاف بسیاری از آسمان خراش ها با طبقات زیاد، برنامه طبقات ایگرک شکل برج خلیفه، موجب افزایش

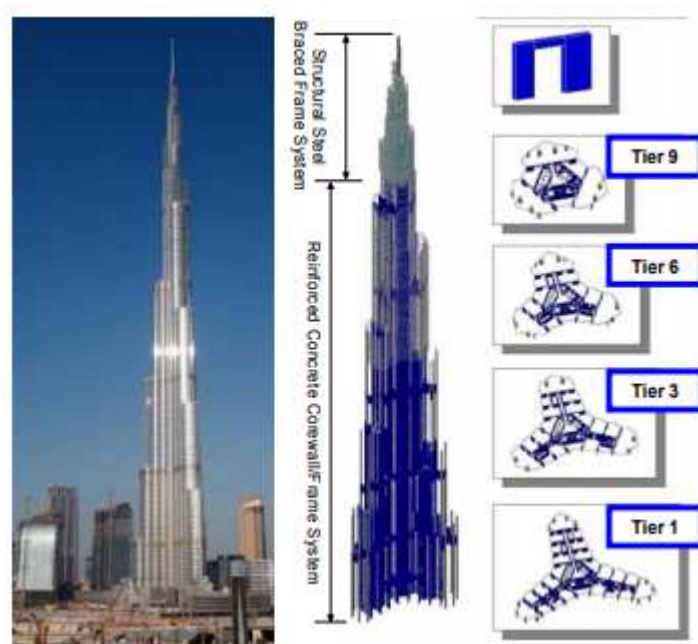
میدان دید شده و نور طبیعی زیادی را وارد ساختمان می کند. ساختمان ایگرک شکل با یک شکست در هر هفت طبقه، بخشی از مفهوم طرح اصلی بود که امکان برنده شدن رقابت طرح پیشنهادی را به اسکایدمور اوینگ و مریل می داد.

آسمان خراش برج خلیفه به عنوان یک ساختمان بتونی مسلح با بتون با عملکرد بالا از سطح پی تا طبقه 157 طراحی شده است و با فولاد سازه ای از طبقه 156 تا بالاترین نقطه مهار بندی شده است. مهندسان، سازه بتنی برج را که به شکل یک Y پهن است، به فرم پله ای ساخته اند، در نتیجه برج دارای سطح مقطع متغیری است. این ترفند برای کاهش نیروی باد بر برج استفاده شده و علاوه بر مزایای زیبایی و کارکردی، برای شکل دادن هسته سازه ای برج نیز به کار رفته است. هر کدام از بال های برج، بال های دیگر را توسط هسته مرکزی شش ضلعی برج نگهداری می کند. هسته مرکزی همچنین مقاومت پیچشی سازه را فراهم می آورد. دیوارهای میانی در هر بال از هسته مرکزی تا انتهای بال امتداد می یابد و به دیوارهای سرچکشی ختم می شوند. این دیوارهای میانی به همراه دیوارهای سرچکشی مشابه جان و بال یک تیر عمل می کنند و مقاوت سازه را در برابر برش و خمش ناشی از باد تامین می کند. ستون های پیرامونی و طبقه همکف برج نیز این سیستم را تکمیل می کند. نتیجه کار برجی است که در برابر حرکت جانبی و پیچشی، بی نهایت مقاوم است. برج دبی در بلندترین نقطه خود در اثر نیروهای جانبی حداکثر 1.2 متر نوسان می کند. شاید این مقدار زیاد به نظر برسد، اما اگر ساکنان برج از پنجره به بیرون نگاه نکنند، متوجه این حرکت نخواهند شد. بیش از 40 تست تونل باد مختلف بر روی برج خلیفه انجام شده است تا تمام آثار باد در ارتفاع 800 متری از سطح دریا بر روی برج مشخص شود. برج خلیفه از سه بخش پایینی، میانی و بالایی تشکیل شده است. هر کدام از این قسمت ها به گونه متفاوتی طراحی شده اند تا در برابر جریان باد و همچنین تغییرات فشار و دما رفتارهای متفاوت و آرمانی داشته باشند.

از زمان آغاز فرایند طراحی، طراحی سازه ای برج بر اساس اهداف تلفیق مفهوم طراحی معماری و سازه ای تدوین شد و شامل راهبرد سازه ای زیر بود

- انتخاب و بهینه سازی سیستم سازه ای برج از نظر مقاومت، مقرون به صرفگی، افزونگی و سرعت ساخت
- استفاده از جدید ترین فناوری های در مصالح سازه ای که در بازار محلی موجود است با در نظر گرفتن قابلیت دسترسی به روش های ساخت و ساز و نیروی کار ماهر محلی

- مدیریت و مکان یابی سیستم مقاومت بار گرانش برای بیشینه سازی استفاده از آن در مقاومت بار های جانبی ضمن هماهنگی با طراحی ساختاری برج هتل و مسکونی
- استفاده از جدید ترین نوآوری ها در آنالیز، طراحی، مصالح و روش های ساخت و ساز
- محدود کردن جا به جایی ساختمان در استاندارد ها و معیار های طراحی بین المللی
- کنترل جا به جایی نسبی بین اعضای عمودی
- کنترل پاسخ دینامیک برج تحت بار گذاری بادی با تعدیل خصوصیات ساختاری ساختمان برای بهبود رفتار دینامیکی و پیش گیری از ارتعاش. رفتار دینامیکی مطلوب برج با موارد زیر حاصل می شود:
- تغییر شکل ساختمان در امتداد ارتفاع ضمن تداوم بدون اخلاص در سیستم مقاومت به بار جانبی
- کاهش پلان طبقه ها در امتداد ارتفاع، و دوکی شکل کردن ساختمان ها
- استفاده از اشکال ساختمانی برای معرفی اثرات در امتداد ارتفاع کل برج از جمله طره، برای کاهش اثرات بادی دینامیک.
- اگرچه چندین روش سازه ای در نظر گرفته شده اند، بتون با عملکرد، مقاومت، پیوستگی، پمپاژ و سرعت ساخت و ساز، قابلیت دسترسی به بتون با عملکرد بالا و سیستم های پیشرفته و استفاده مسکونی از ساختمانی نیز به عنوان مصالح سازه ای اصلی برای برج در نظر گرفته شده اند.



شکل 2: سیستم های مقاومت بار جانبی و تصویری از برج کامل شده

1-2-2 سیستم مقاومت بار جانبی

سیستم مقاومت بار جانبی متشکل از دیواره های با هسته خمشی و بتونی مسلح با عملکرد بالا می باشد که متصل به ستون های بتونی خارجی تقویت شده از طریق یک سری پانل های دیواره برشی بتون های مسلح در سطح مکانیکی است شکل 2 را ببینید.

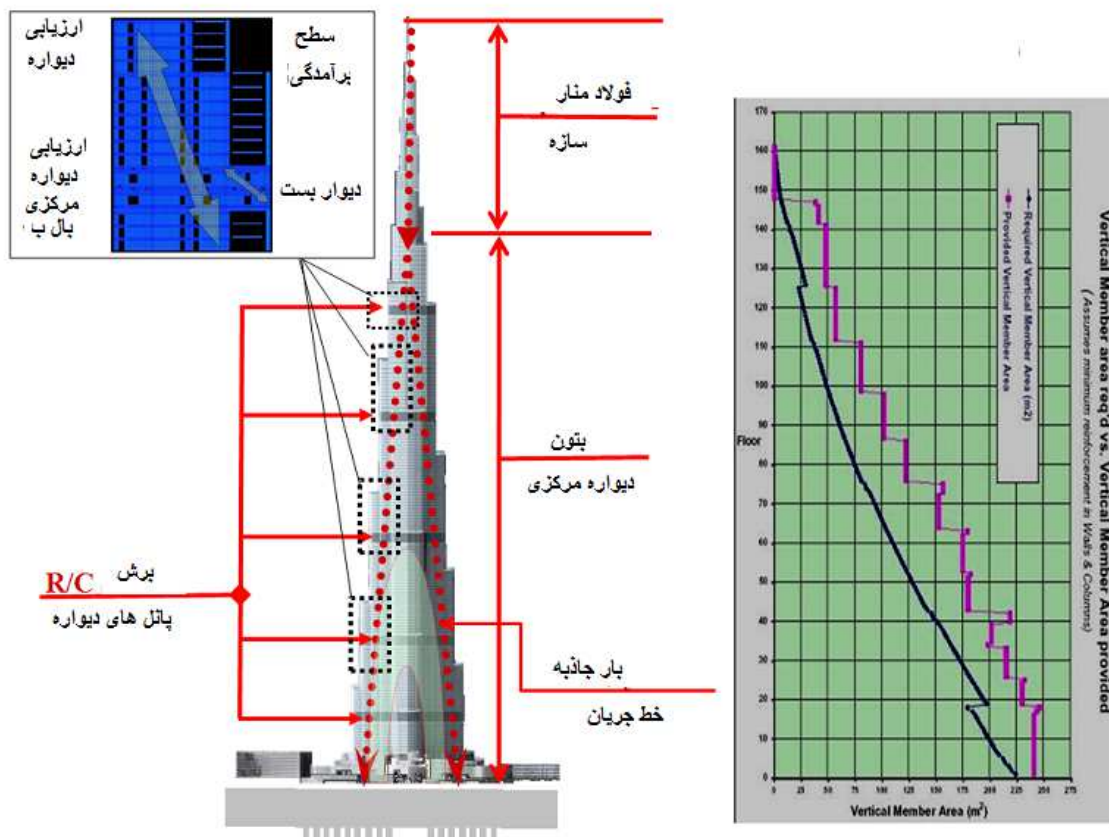
دیواره مرکزی از نظر ضخامت از 1300 میلی متر تا 500 میلی متر متغیر است. دیواره های مرکزی معمولاً از طریق یک سری بتون های مسلح با عمق 800 تا 1100 میلی متر و یا تیر های کامپوزیتی در هر طبقه به هم متصل می شوند. به دلیل محدودیت عمق اتصل تیر ها، تیر های اتصالی خمشی با جنس کامپوزیت در مناطق خاصی از سیستم دیواره مرکزی تعبیه می شوند. این ک تیر ها معمولاً متشکل از صفحات برشی فولادی یا تیر های I شکل فولاد سازه ای می باشند طوری که داربست های برشی در مقطع بتونی قرار گرفته است. پهنای تیرچه اتصالی معمولاً منطبق بر ضخامت دیواره جانبی است.

در راس دیواره بتونی مسلح مرکزی، یک منار مخروطی بسیار بلندی وجود دارد که آن را تبدیل به یکی از بلند ترین برج های جهانی کرده است. سیستم مقاومت بار جانبی مناره، متشکل از یک سیستم مهار بند فولادی سازه ای متعامد از طبقه 156 تا راس منار یعنی تا 750 متری زمین است. مخروط منار متشکل از یک مقطع لوله ای فولادی سازه ای با قطر 2100 و ضخامت 60 میلی متر در پایه تا 1200 میلی متر و 30 میلی متر در راس است (828 متر).

2-2-2 بهینه سازی سیستم سازه و مدیریت بار گرانشی

اگرچه رفتار بادی سازه های آسمان خراش و بسیار بلند، یکی از مهم ترین معیار هایی است که باید در نظر گرفته شود، مدیریت بار جاذبه یا گرانش، نیز بسیار مهم است زیرا اثر مستقیمی بر کارایی و عملکرد کلی برج دارد و بایستی در مراحل اولیه طراحی، هنگام توسعه طراحی و تلفیق مفاهیم طراحی سازه ای و معماری مد نظر قرار گیرد. ابزار ها و روش های توزیع مجدد بار گرانشی دارای یک سری مشکلات خاص خود می باشند و در صورتی که به خوبی مدیریت نشوند منجر به پیچیدگی های و مشکلاتی در فرایند طراحی و ساخت خواهند شد. تعادل بین مدیریت بار جاذبه و جریان بار جاذبه در سازه بتونی، یک هنر مهندسی سازه است که مستلزم درک عمیقی از مواد و مصالح و رفتار سیستم سازه ای در مراحل اولیه طراحی است.

شکل 3: سیستم مقاومت بار جانبی و تصویری از برج کامل شده



شکل 3: سیستم مقاومت بار جانبی و تصویری از یک برج کامل

در شکل 3، تحلیل بار جاذبه، توسط نویسنده همین مقاله ارائه شده است که، سطح بتون مورد نیاز را برای تحمل بار های جاذبه برج بدون ملاحظاتی برای کاهش اندازه عضو را با بتون واقعی استفاده شده برای طرح نهایی برج مقایسه می کند. شکل 3 نشان می دهد که مصالح باید به بار جاذبه مقاومت نشان دهند و این مصالح باید در برابر اثر ترکیبی بار های جانبی و جاذبه مقاوم باشند که نشان دهنده کارایی سیستم سازه ای است. تنها مصالح اضافی مورد نیاز برای برج خلیفه به دلیل گرد کردن اندازه تیر و مصالح اضافی مورد نیاز باز توزیع بار ها در دو طرف ساختمان در دیواره های سر چکشی و ستون های دماغی است اگرچه تیرچه ها در هر طبقه و در هر سطح دیوار بست استفاده می شوند. دیواره های چکشی و ستون های دماغی که در بخش های مختلف ساختمان قرار گرفته اند، نقش زیادی در گشتاور اینرسی برج و مقاومت آن به مومنت واژگونی برج به دلیل بار های جانبی دارند. شکل های 3 و 4 نیز مدیریت جریان بار جاذبه را به موازات و امتداد ارتفاع سازه نشان می دهد. محدودیت های ضخامت دیواره مرکزی و ضخامت دیواره بال امکان می دهد تا بار جاذبه به طور آزاد به طرف

دیواره شبکه منار ودالان مرکزی و دیواره های سر چکشی و ستون های دماغی برای ماکزیمم بار در برابر بار های جانبی منتشر شود. در امتداد این سطوح، یک سری دستکاه های سنجش جریان بار برای پایش جریان بار جاذبه استفاده می شوند. همان طور که قبلا گفته شد، جریان بار به طرف دیواره سر چکشی، منجر به پنالتهی کم می شود زیرا به طور طبیعی در سازه بتونی رخ داده و موجب وارد شدن بار به درون ستون های دماغی شده و مشکلاتی را در طراحی سازه ایجاد می کند. به نظر من سیستم های پیشرفته آینده می توانند این مشکلات را نداشته باشند. دیواره مرکزی بتون مسلح در طبقه 156 یک تکیه گاهی را برای منار ایجاد می کند.

3-2-2 مدیریت مهندسی باد

- مهندسی باد، یکی از نگرانی های اصلی در طراحی سازه های بلند است. شکل پروژه برج خلیفه، نتیجه همکاری بین معماران SOM و مهندسان سازه ای است. چندین روش مهندسی سازه در طراحی برج برای کنترل پاسخ دینامیکی برج تحت بار باد با کاهش تشکیل گرد باد در امتداد سازه و تعدیل خصوصیات دینامیکی سازه برای بهبود رفتار دینامیکی آن و پیش گیری از ارتعاش استفاده شده است. مدیریت مهندسی باد برج با کار های زیر انجام می شود

➤ تغییر شکل سازه در امتداد ارتفاع ضمن وجود یک سیستم مقاومت بار جانبی و جاذبه ساختمانی

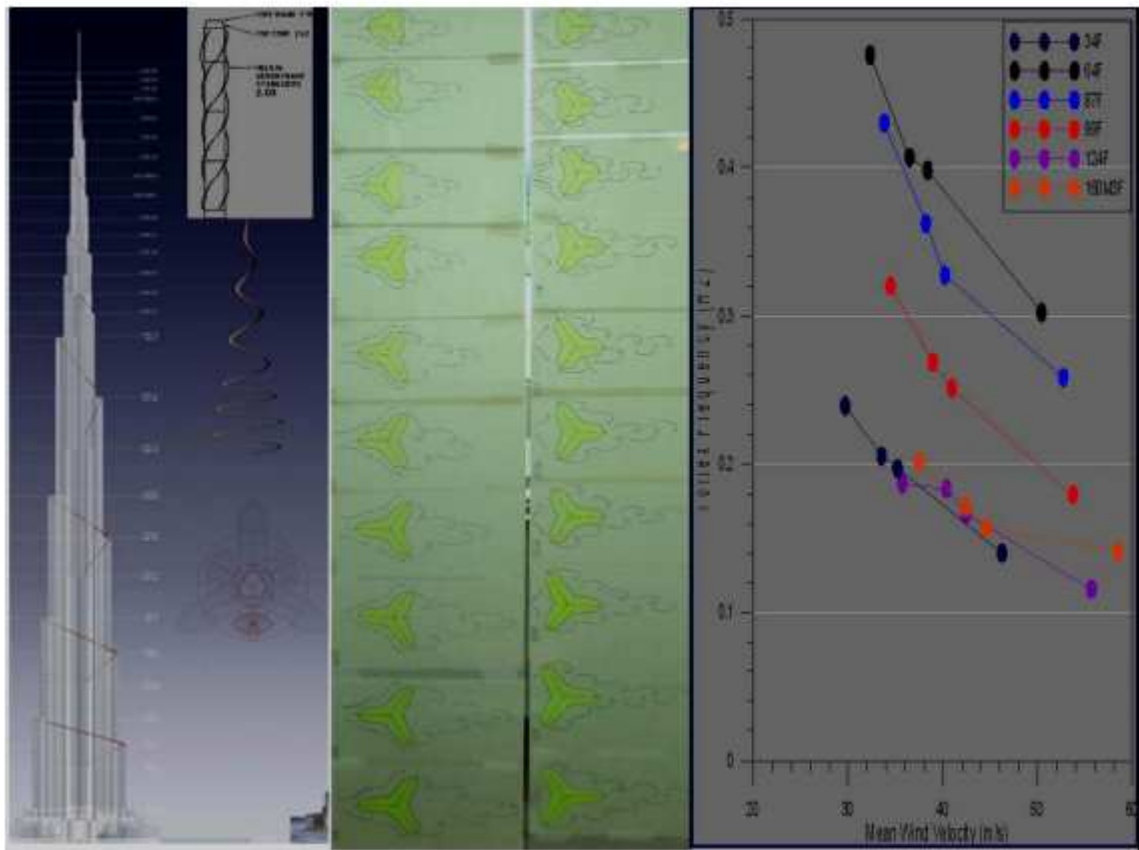
➤ کاهش پلان طبقه در امتداد ارتفاع، و دوکی شکل کردن پروفیل سازه

➤ استفاده از اشکال ساختمانی برای همسو سازی اثرات باد در طول کل منار و به منظور کاهش ارتعاشات دینامیکی باد

➤ تغییر جهت برج در پاسخ به جهت باد، و مقاوم سازی سازه به بدترین جهت بادی

شکل چهار، طرح های مفهومی اولیه را برای نشان دادن اثر تغییر شکل ساختمان در راستای ارتفاع از زمان طراحی اولیه (مرحله مفهومی) برای حداقل سازی نیرو های باد بر روی برج به تصویر کشیده است. تغییر شکل برج و پهنای آن، موجب ایجاد گرد باد حول قطر برج می شوند که رفتار متفاوتی را برای اشکال مختلف در فرکانس های مختلف نشان داده و از این روی اثر متقابل سازه برج را با باد کاهش می دهد.

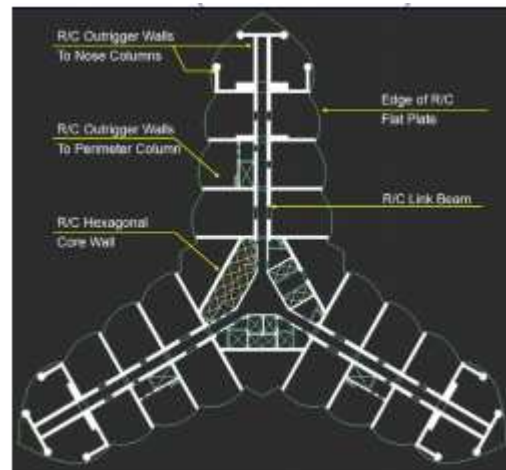
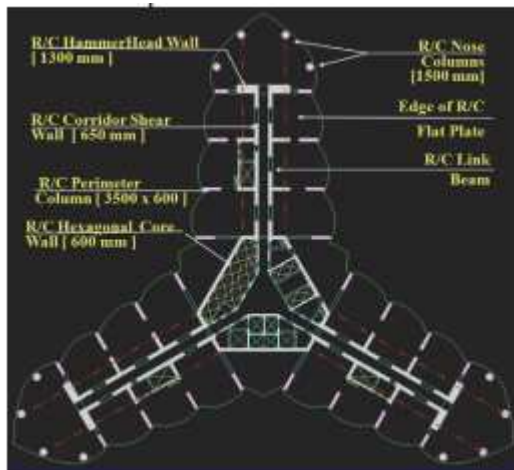
از زمان آغاز پروژه، مطالعات تونل بادی و رژیم های آزمایشی برای افزایش دانش از رفتار بادی ساختمان و تایید راهبرد های مدیریت مهندسی باد فوق از جمله تعدیل فرکانس های طبیعی ساختمان و بهینه سازی پاسخ دینامیک ساختمان به ارتعاشات بادی صورت گرفته اند.



شکل 4: تشکیل گرد باد با فرکانس های رزونانس مختلف، در امتداد سازه

4-2-2 سیستم قاب بندی طبقه

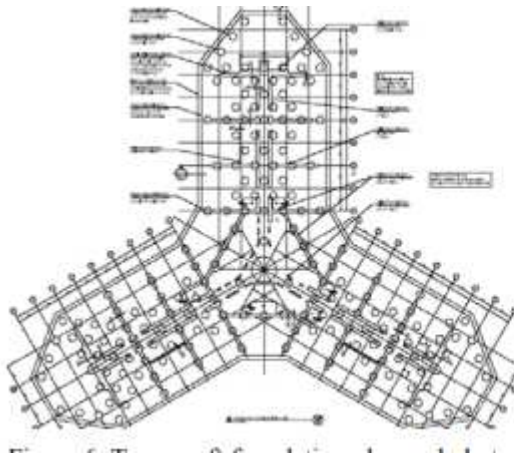
سیستم قاب بندی طبقه هتل و بخش مسکونی برج متشکل از یک اسلب بتونی مسلح دو سويه 200 تا 300 متری می باشند که ارتفاع آن بین 9 متر بین ستون های خارجی و دیواره مرکزی درونی می باشد. سیستم قاب بندی طبقه در نوک طبقه برج متشکل از یک سیستم اسلب بتونی مسلح دو سويه 225 تا 250 میلی متر است. سیستم قاب بندی کف درون هسته داخلی متشکل از یک اسلب بتونی مسلح دو سويه با تیرچه است. برای سیستم قاب بندی در طبقه های مکانیکی و مسکونی، به شکل 5 مراجعه کنید. در سطح مکانیکی، توجه کنید که همه عناصر عمودی برای یکسان سازی توزیع فشار در همه عناصر عمودی متصل به هم می باشند.



شکل 5: پلان های قاب بندی طبقه الف: طبقه هتل ب: طبقه مکانیکی

2.5.2 سیستم فونداسیون

برج بر روی یک شمع بتونی مسلح با عملکرد بالا و ضخامت 3700 میلی متری با یک تکیه گاه -DMD.7 تاسیس شده است. اسلب بتونی مسلح از یک بتون خود متراکم با عملکرد بالای SCC بهره برده و بر روی یک اسلب 100 میلی متری بر روی ممبران ضد آب که آن هم روی یک اسلب 50 میلی متری قرار دارد واقع شده است. انتهای پی و کناره ها با ممبران های ضد آب محافظت می شوند. به شکل 6 مراجعه شود.



شکل 6: پلان فونداسیون برج و تصویری از ساخت پی متکی بر شمع

برج بر روی یک شمع بتونی مسلح با عملکرد بالا و به قطر 192 تا 150 میلی متر ساخته شده که تا 45 متری قاعده پی گسترش دارد. همه شمع ها از بتون خود متراکم با نسبت W/C کم تر از 0.30 استفاده می کنند که در یک بتن پیوسته با استفاده از روش ترمی قرار می گیرد. ارتفاع شمع نهایی -DMD 55 برای دست یابی به ظرفیت شمع 3000 تن است.

علاوه بر ایجاد عملکرد زیاد، بتون با دوام بالا برای سیستم های فونداسیون برج، یک غشای ضد آب و سیستم های حفاظت کاتدی برای حفاظت از شرایط خوردندگی خاک در محل برج قرار داده شدند.

3- توصیف سیستم پایش سلامت سازه ای

پروژه برج خلیفه، اکنون بلندترین ساختمان ساخته شده توسط دست بشر در دنیا است. اگرچه توسعه ملزومات سیستم سازه ای و تلفیق آن ها به یک مفهوم طراحی معماری کاری جدید بود، برنامه ریزی ساخت برج از هر نظر بسیار سخت بوده و نیازمند استفاده از جدیدترین فناوری ها در روش های ساخت و ساز با بالاترین درجه سخت بود. بدین ترتیب یک برنامه پایش سلامت سازه ای پیشرفته باید متشکل از موارد زیر باشد

- برنامه پایش و نظرسنجی گسترده برای اندازه گیری نشست پی، کوتاه شدگی ستون و حرکات جانبی سازه طی ساخت
- نصب کرنش سنج برای اندازه گیری کرنش ها در اعضای سازه نظیر شمع، پی، دیواره، ستون ها و داربست ها و پانل های دیواره
- نصب برنامه پایش سلامتی آنی موقت برای اندازه گیری جا به جایی جانبی ساختمان و شتاب آن طی سخت و ساز و شناسایی خصوصیات دینامیک (فراوانی و میرایی) طی ساخت و ساز. این سیستم شامل شتاب سنج های دو بعدی، جی پی اس و ایستگاه هوت شناسی (سرعت باد، جهت باد، رطوبت و دما) است.
- نصب یک برنامه پایش سلامت سازه دایم برای اندازه گیری حرکات ساختمان نظیر جا به جایی به دلیل بارهای جانبی (باد و زلزله) و یا دیگر بارهای جانبی غیرمنتظره. علاوه بر سیستم اطلاعات جغرافیایی، شتاب سنج ها و صوت سنج ها در طبقات در امتداد ارتفاع داده های مربوط به زلزله و باد را در اختیار قرار می دهد. نصب این ابزارها می تواند نتایج زیر را در پی داشته باشند: 1- توسعه مدل ائرولاستیک تمام مقیاس از برج ضمن ارایه بازخورد ها و جزییات کامل از خصوصیات دینامیکی برج 2- داده های کافی برای ارزیابی رفتار خستگی سازه فولادی 3- سرعت و توزیع باد در امتداد سازه، 4- ارایه اطلاعات به تیم مدیریت در خصوص حرکات سازه برای مدیریت بهتر مسائل و مشکلات

3.1 توصیف مختصری از برنامه های پایش و نظارتی پیمایشی

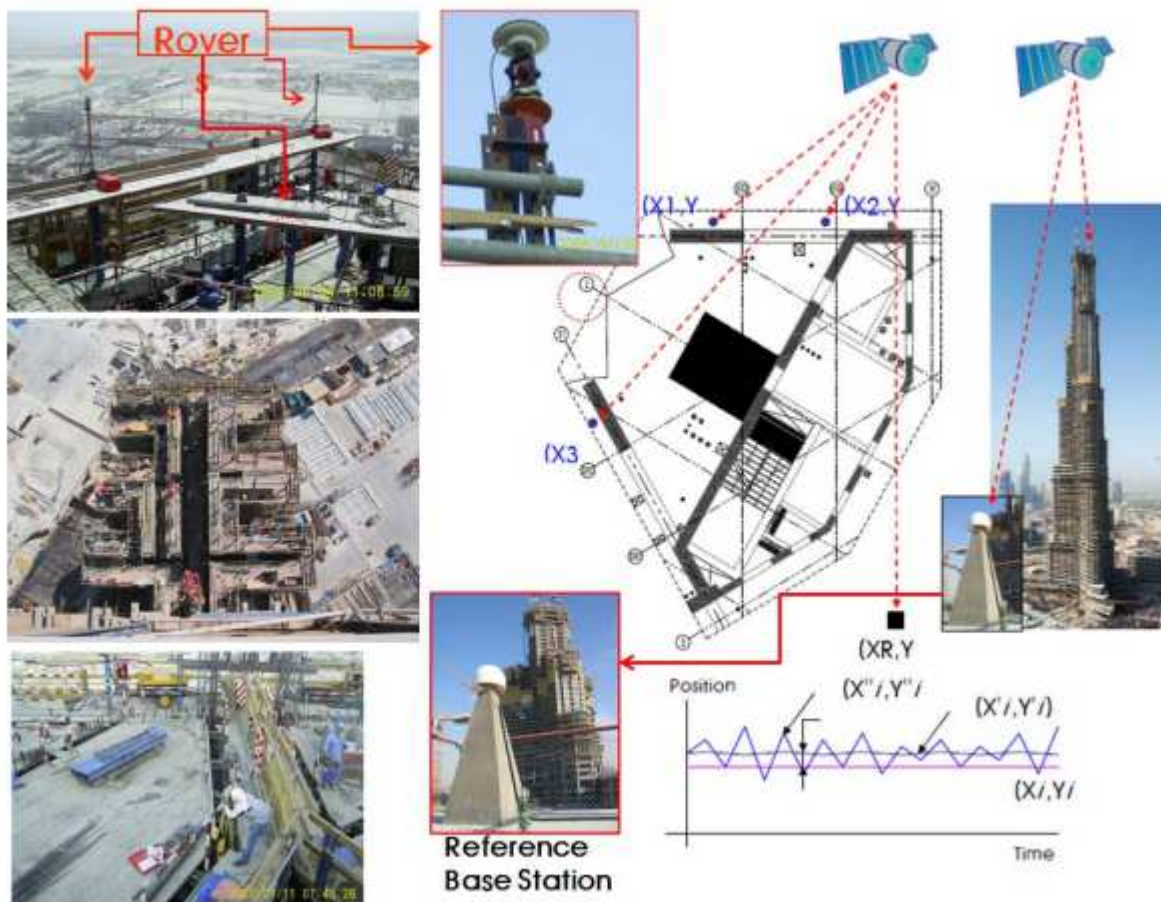
برای ساخت برج چندین برنامه پیمایشی اتخاذ شده است که شامل استفاده از پیشرفت های نوین در ایستگاه های الکترونیکی ژئودتیک می باشد. این ابزار ها اشاره به نقاط مرجع ثابت با مختصات مشخص دارند که اهمیت زیادی در دقت روش پیمایشی داشته و یک نقطه ثابت به کل ایستگاه در نظر گرفته می شوند. با این حال ، استفاده از نقاط ثابت با افزایش ارتفاع برج، موجب سخت شدن استفاده از نقاط ثابت سطح زمین شد زیرا فاصله بین این نقاط ثابت و کل ایستگاه در بالاترین طبقه، برای مرجع یابی دقیق کل ایستگاه بسیار زیاد بود و فاصله نسبی بین این نقاط بسیار کوچک شد.

به علاوه دقت سیستم پیمایشی با افزایش ارتفاع، باریک شدگی و جا به جایی برج طی ساخت و ساز سخت تر شد. حرکت برج طی ساخت ناشی از موارد زیر بود 1- نوسانات باد-2 بار های متمرکز و عظیم تاج در بالاترین سطح سازه-3 فرونشینی پی، 4- کوتاه شدگی ستون ناشی از اثرات خزش و الاستیک-5 نوسان دمایی روزانه که موجب تغییر 150 میلی متری در ارتفاع ساخت در راس بتون طی شش ساعت شد-6 اثرات غیر یکنواخت خورشید که می تواند موجب کجی برج شود. 7- رانش جانبی ساختمان تحت بار های گرانشی ناشی از توزیع غیر متقارن بار-8 طولانی شدن زمان ساخت و ساز 9- ترکیب بتون (از پی تا طبقه 156) و فولاد (از طبقه 157 تا نوک منار در ارتفاع 828 متری. از این روی، نیاز به برنامه پایش پیمایشی پیوسته برای ایجاد یک موقعیت دقیق از محل ساختمان نسبت به موقعیت طراحی قبلی و تایید محل دقیق کل ایستگاه حایز اهمیت است.

برای غلبه بر مشکلات فوق و کنترل و تعیین محل دقیق ساختمان نسبت به محور عمودی در هر زمان نیاز به 1- درک دقیق تیم پیمایشی از حرکات ساختمان و رفتار آن در سرتاسر دوره ساخت 2- توسعه برنامه های پایشی گسترده همه عناصر ساختمانی موثر بر حرکات ساختمان 3- نسب سیستم اندازه گیری جدید موسوم به ژئوسیستم لیسا همراه با سنسور های دقیق خمیدگی سنج است.

به علاوه، پیچیدگی و اندازه سیستم قالب بندی بالا رونده خود کار به دلیل شکل سازه، نیاز به تعداد زیادی نقطه کنترل در هر طبقه دارد که به پیچیدگی روش پیمایش می افزاید. از این روی، ساده سازی روش پیمایش و سیستم لازم است طوری که نقاط کنترل، حتی زمانی که ساختمان در حال حرکت است، را می توان یک باره اندازه گیری کرد. سیستم اندازه گیری برای استفاده در هر طبقه کاربرد داشته و متشکل از 1- گیرنده جی پی اس تعبیه شده بر روی قطب هایبلند در راس قالب ACS برای تثبیت کنترل پیمایش در بالاترین سطح-2 سه

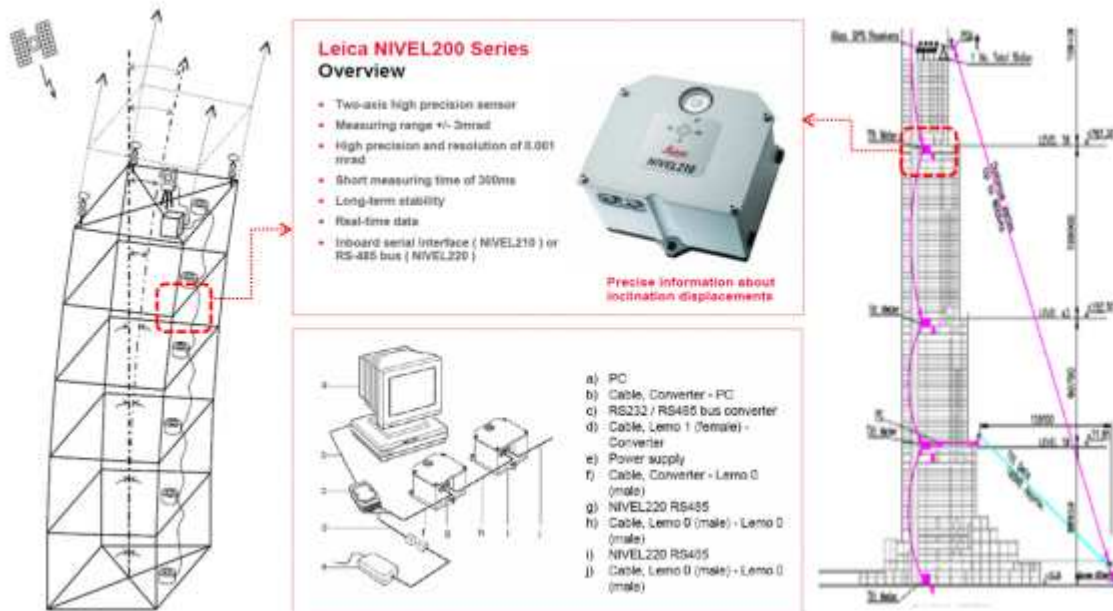
منشورمدور در زیر گیرنده و 3- دستکاه TPS که در راس بتون قرار گرفته و برای همه ایستگاه های جی پی است قابل رویت است. برای درک دقیق سیستم اندازه گیری به شکل 7 مراجعه شود.



شکل 7- سیستم اندازه گیری: نقاط کنترل جی پی است، ایستگاه کل، ایستگاه مرجع

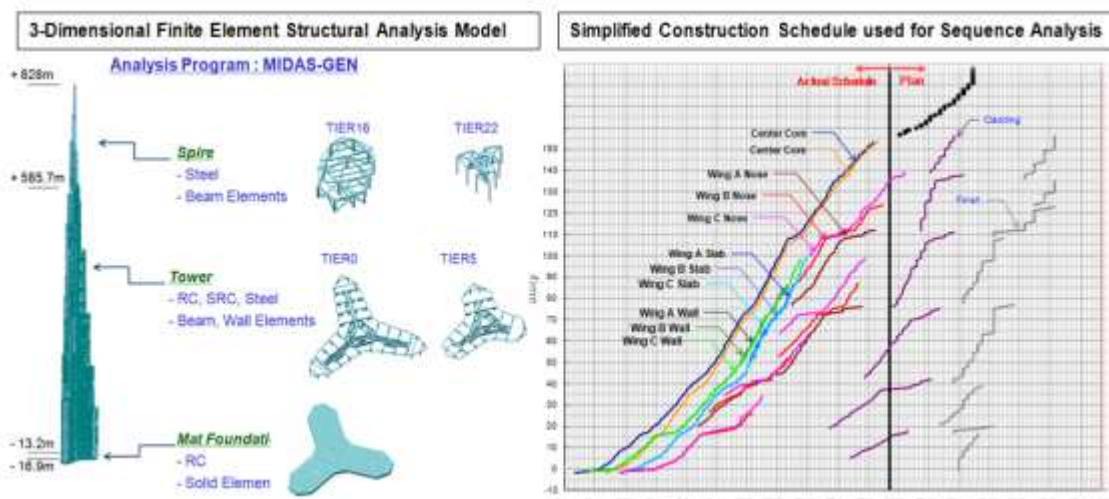
سیستم اندازه گیری در هر طبقه با یک دستکاه متشکل از هشت شیب سنج، شیب سنج های دقیق دو محوری لیبسا نیول، برای پایش حرکات جانبی ناشی از بار و تنظیمات سیستم قالب بندی تا مرکز هندسی در هر طبقه تلفیق شده است. این برنامه تصحیحی برای حفظ عمودی ماندن برج و حفظ مقاومت ساختمان در هر طبقه لازم است. شیب سنج ایت لیبسا نیول 200 دو محوری نیز برای تعیین چرخش برج و محاسبه جا به جایی برج در جهات ایکس و ایگرگ نسبت به فونداسیون پی استفاده می شود. شیب سنج ها بر روی دیواره مرکزی بدون هر گونه تغییر قرار گرفته و به کابل سینگل باس RS-485 و به یک پورت بی سیم با نرم افزار لیبسا گوموس واقع در دفتر پیمایش متصل هستند. برای مشاهده طرح شماتیکی از سیستم اندازه گیری با شیب سنج ها به شکل 8 مراجعه کنید. این شیب سنج ها نسبت به کنترل پیمایشی در هر سطح با پایش ارتفاع کالیبره می شوند. یک سری مشاهدات و پیمایش ها از جا به جایی های ایکس و ایگرک برای این شیب سنج مجدداً برای مطالعات

بعدی استفاده می شود. داده ها و مشاهدات جمع اوری شده از شیب سنج ها، جی پی اس با منشور و ایستگاه کل تجزیه تحلیل شده و برای تعیین موقعیت دقیق سیستم قالب بندی ACS استفاده شد.



شکل 8- شماتیکی از سیستم اندازه گیری یکپارچه با شیب سنج

اگرچه توصیف اجرای سیستم پیمایش برج امری جدید است ولی نمی توان آن را در این جا کاملا تشریح کرد ولی این مقاله برنامه مورد نظر را برای اندازه گیری حرکات واقعی استفاده کرده و شامل 1- نشست پی 2- کوتاه شدگی دیواره و ستون ناشی از اثرات خزش و الاستیک 3- جا به جایی جانبی برج در هر سطح برآمدگی 4- جا به جایی جانبی ساختار منار طی ساخت و ساز و عملیات لیفتینگ. همه پایش های دوره ای در صبح انجام شدند تا از اثرات خورشید اجتناب شود.

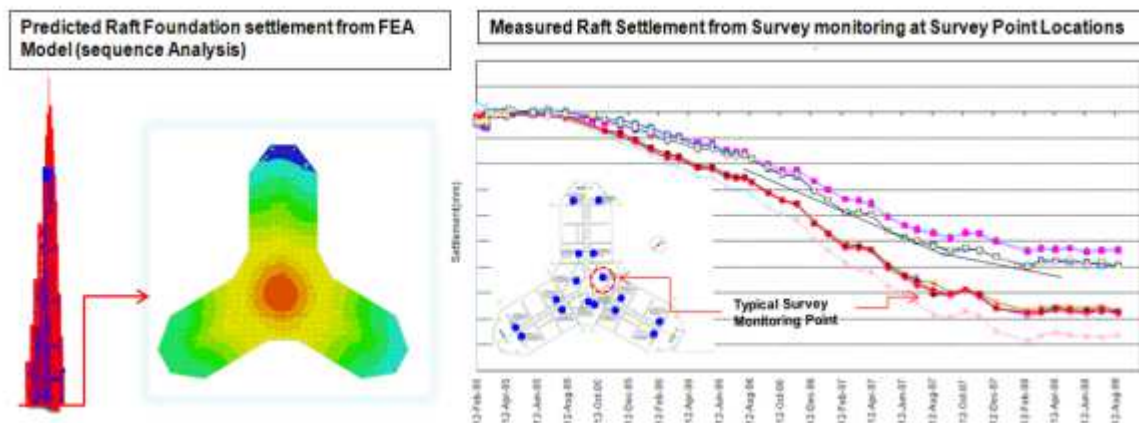


شکل 9- مدل سه بعدی FEA و طرح ساختار ساده مورد استفاده برای تحلیل بعدی

برای مقایسه حرکات ساختمانی واقعی اندازه گیری شده با حرکات پیش بینی شده، یک مدل آنالیز سازه ای عنصر محدود برای برج خلیفه با در نظر گرفتن خصوصیات مصالح و انعطاف پذیری فونداسیون ارائه شد. این مدل تحلیل برای شبیه سازی توالی ساخت برج با در نظر گرفتن کار های واقعی انجام شده به صورت تابعی از زمان استفاده می شود که در شکل 9 توضیح داده شده است. هدف این مدل پیش بینی 1- نشست پی 2- جا به جایی جانبی برج از فونداسیون تا راس منار 3- کوتاه شدگی ستون یا دیواره ناشی از اثرات کشسانی و خزشی 4- کرنش های ستونی و دیواره ای الاستیک ناشی از اثرات کشسانی و خزشی 5- کنترل طراحی مقاومت عناصر اصلی به خصوص در تیر های اتصالی و بست ها 6- جا به جایی جانبی ناشی از رویداد های لرزه ای و بادی طی ساخت و ساز بعد از تکمیل برج

3-1-1 پیمایش نشست پی

همان طور که در بالا گفته شد، مدل سه بعدی تحلیل عناصر محدود اثرات متقابل سازه خاک برای شبیه سازی توالی سازه ای برج ایجاد شد که شامل مدل تحلیل سیستم پی متکی بر شمع، از جمله انعطاف پذیری سیستم فونداسیون بود. نشست پی بر اساس مدول واکنش ارائه شده توسط مشاوران مهندسی برآورد شد. با این حال، مقاومت و سفتی پی بر اساس نشست های اندازه گیری شده واقعی تعدیل شد. مدل تحلیل اثرات متقابل ساختمان خاک و مدل سه بعدی، کوتاه شدگی محور شمع، انعطاف پذیری خاک و اثر سفت شدگی فراساختار در نظر می گیرد. 16 نقطه پیمایشی در راس پی برای اندازه گیری نشست ماهانه تا زمان تکمیل شدن سازه نصب شد.



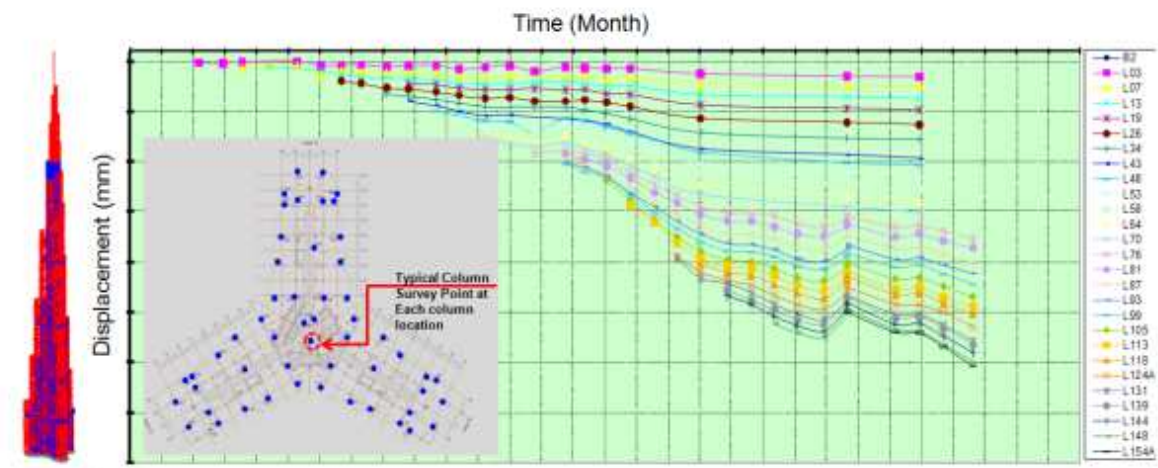
شکل 10- نقطه پیمایش فونداسیون و نشست پی اندازه گیری شده

مقایسه بین نشست های پیش بینی شده از مدل تحلیل توالی ساخت و سه بعدی و مقادیر نشست اندازه گیری شده علی رغم پیچیدگی های موجود در تحلیل سازه ای و پارامتر های مهندسی ژئوتکنیکی عالی بودند.

3.1.2 پیمایش کوتاه شدگی ستون و دیواره

چون برج خلیفه بزرگ ترین سازه است، کوتاه شدگی ستون یکی از مهم ترین مسائل در نظر گرفته شده در مراحل اولیه و مراحل ساخت و ساز می باشد. توسعه سیستم سازه ای برج تا حدودی این مسئله را با برابر سازی سطح فشار و شکل هندسی عناصر عمودی حل کرده است. اگرچه در هر طبقه بیشتر عناصر دیواره به هم پیوسته است، دیگر دیواره های جانبی و ستون های دماغی از طریق پانل های دیواره برشی چهار طبقه در طبقات مکانیکی برای در گیر کردن همه اعضای عمودی در سیستم جانبی و استفاده از توزیع فشار و جاذبه بار بین آن ها به هم متصل می شوند. برای برآورد بهتر دیواره و کوتاه شدگی بلند مدت، برنامه های آزمایش خزش و کرنش بتونی توسط سامسونگ در آغاز ساخت و ساز برای پایش خصوصیات خزش و کشسانی بتون توسعه یافتند. داده های آزمایش واقعی بتون در تحلیل توالی ساخت و ساز سه بعدی FEAM برج برای پایش بینی فشار های ستون و دیواره واقعی و کوتاه شدگی طی ساخت و ساز استفاده شدند. همبستگی بین کرنش های پایش بینی شده سامسونگ و کرنش های کل دیواره و ستون عالی بود. از این روی اعتماد بهتری برای پایش بینی های تحلیلی و ایجاد تغییرات در برنامه جبران حاصل می شود.

مفهوم برنامه پایش در شکل 11 برای نظارت و کنترل کوتاه شدگی کل ستون در هر سطح برآمدگی نشان داده شده است که توسط تیم پایشی هرساله گزارش شده است. این اندازه گیری های پیمایشی 1- هر ماه توسط محقق انالیز شده و با اندازه گیری های پایش بینی شده مقایسه شدند 2- به عنوان ابزاری برای کنترل خصوصیات رفتاری ساختاری سازه استفاده شده و 3- امکان مدیریت بهتر ساخت و ساز برج را می دهد. شکل 11 تعداد نقاط پیمایشی اندازه گیری شده در هر سطح و نمونه ای از کوتاه شدگی ستون را در مرکز هسته نسبت به بتون تا زمان تکمیل سازه نشان می دهد. ارزیابی کوتاه شدگی دیواره و ستون اندازه گیری شده در همه بخش ها نشان می دهد که کوتاه شدگی ستون در دامنه مورد انتظار است.

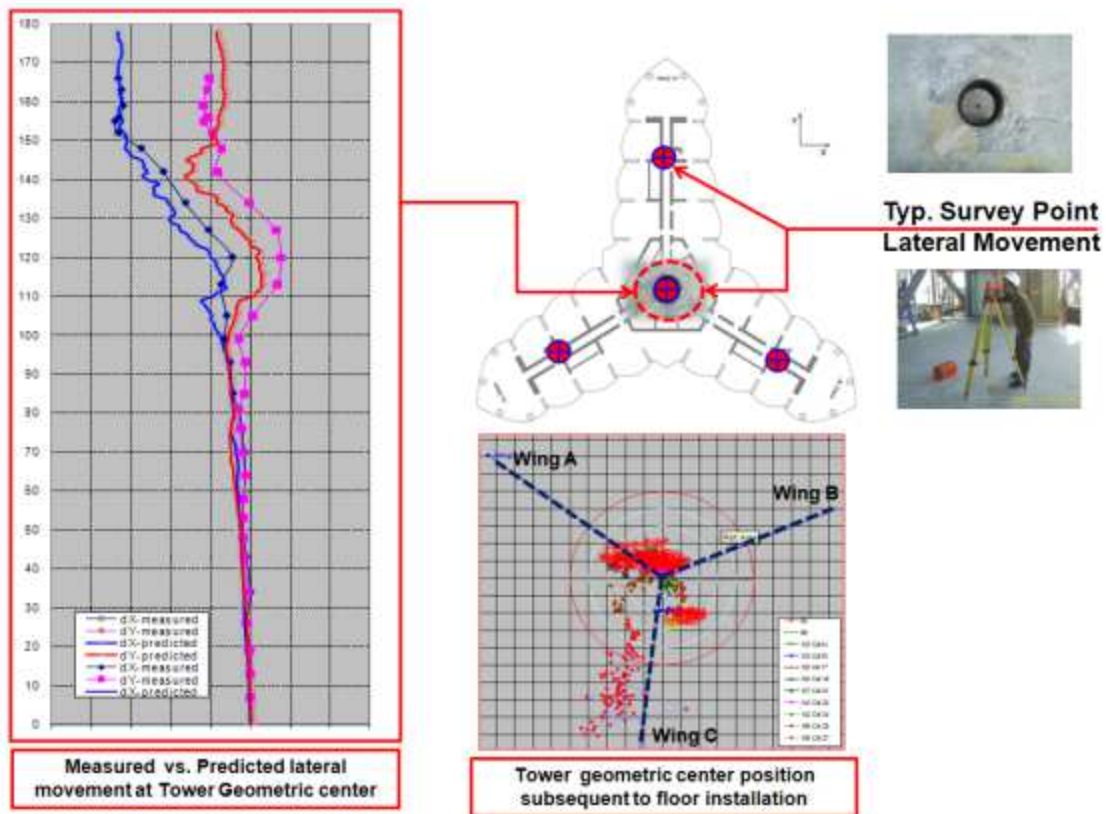


شکل 11: موقعیت نقاط پیمایشی در همه بخش های ستون و دیواره و کوتاه شدگی دیواره مرکزی برای پیمایش نصب نقطه ای در همه سطوح پیمایشی.

3.1.3 پیمایش جا به جایی جانبی برج طی ساخت

به دلیل تغییرات پیوسته در شکل و مرکز بار ثقلی نسبت به مرکز پی، برج طی ساخت و ساز جا به جایی جانبی داشته است. به منظور پایش جا به جایی های برج و تصحیحات لازم برای حفظ عمودیت برج، ساخت برجی در راس هندسی، جابه جایی جانبی بار به طور روزانه در بخش پیمایش برج، پایش شد. برنامه پایش نوری ماهانه در هر سطح برون آمدگی برای اندازه گیری جا به جایی جانبی در زمان نصب انجام شد/شکل 12 در زیرمحل نقطه پیمایش را در هر سطح برون آمدگی برای پایش حرکات جانبی به صورت تابعی از زمان نشان می دهد.

مقایسه بین جا به جایی جانبی پیش بینی شده و اندازه گیری شده که در شکل 12 نشان داده شده است یک همبستگی عالی را نشان داد. جا به جایی پیش بینی شده بر اساس مدل های تحلیل عناصر محدود سه بعدی بود که مقاومت پی، خصوصیات مصالح و برنامه ساخت و ساز را برای همه فعالیت های ساخت و ساز به صورت تابعی از زمان نشان می دهد. این تحلیل توسط سامسونگ به طور منظم برای مقایسه جا به جایی های جانبی اندازه گیری شده به حرکات جانبی پیش بینی شده طی ساخت برج بعد از تکمیل برج و بعد از سی سال ساخت برج صورت گرفت برای جبران و اصلاح این جا به جایی، سامسونگ برج را در مرکز هندسی در هر طبقه ساخت.



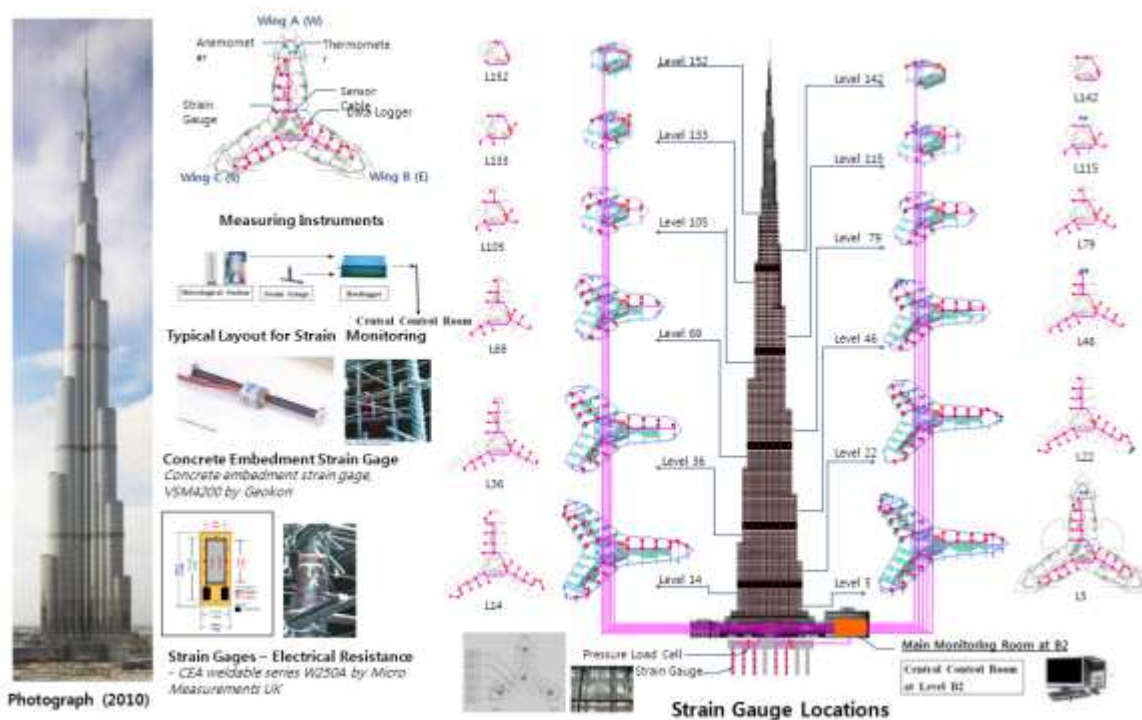
شکل 12: جا به جایی جانبی پیش بینی شده در برابر اندازه گیری شده در مرکز هندسی، در هر طبقه برون زده و موقعیت مرکز برج با زمان

3-2 اندازه گیری کرنش طی ساخت و ساز و شرایط ساختمانی دائم

به منظور مدیریت کوتاه شدگی ستون و مسائل جا به جایی جانبی برج، یک برنامه اندازه گیری کرنش ایجاد شد که در شکل 13 برای اندازه گیری کرنش کل در دیواره ها و ستون ها که به دلیل کرنش های الاستیک، خزش ایجاد می شود نشان داده شده است. برنامه پایش کرنش کل معمولا در مناطقی قرار داده می شود که تحت تاثیر شرایط کرنش محلی قرار نمی گیرند و در دو طبقه زیر و بالای سطوح داربست قرار گرفته اند طوری که توزیع بار مجدد در آن ها انتظار می رود. شکل 13، 1- موقعیت کرنش سنج ها را در سرتاسر برج برای اندازه گیری کرنش دیواره و ستون 2- محل کرنش سنج ها را در شمع ها برای اندازه گیری توزیع کرنش در امتداد طول شمع 3- محل قرار گیری کرنش سنج ها را در شمع برای اندازه گیری کرنش خمشی در انتهای پایه پی 4- محل سلول های بار را در فونداسیون برای اندازه گیری انتقال بار مستقیم از پی تا لایه ماسه سنگ بالایی و 5- ایستگاه های

هواشناسی موقت نصب شده در طبقات مختلف را برای اندازه گیری دما، رطوبت، سرعت و جهت باد نشان می دهد.

سازه فوقانی برج 1- مجموع 197 کرنش سنج مقاومت الکتریکی در بتون قرار گرفتند. فونداسیون متکی بر شمع برج 24 کرنش سنج با سیم ارتعاشی، سه روزت سنج در سلول های بارداشت. اندازه گیری کرنش در شکل 13 زیر در مقایسه با کرنش های پیش بینی شده برج از مدل تحلیل سازه و 3D-FEMA سامسونگ از زمان نصب دستگاه کرنش سنج تا زمان کامل شدن ساخت برج نشان داده شده است. این حال، مشکلاتی در اندازه گیری پیوسته به دلیل محدودیت های مکانی به وجود آمد. اندازه گیری های کرنش از زمان بتون ریزی تا تکمیل برج صورت گرفت. اندازه گیری های کرنش افزایش دما را در عناصر بتونی بزرگ و زمان تعدیل این دما با دمای محیط را ثبت کرد.



شکل 13

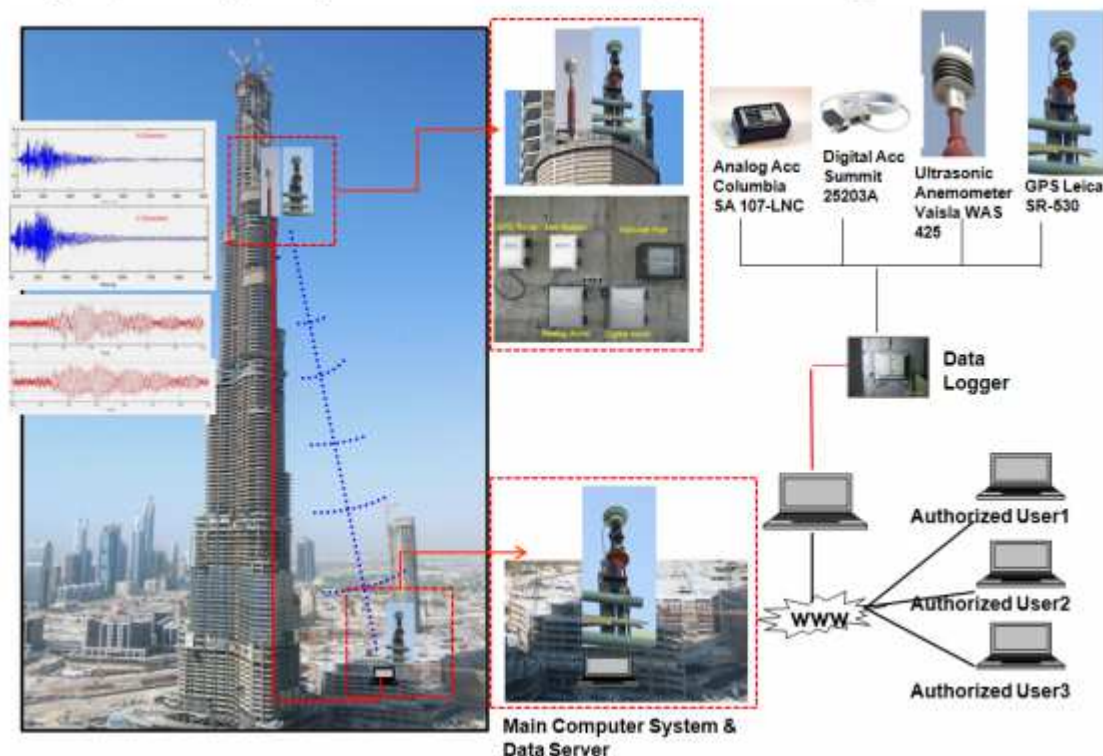
3.2.1 انتخاب برنامه و شبکه پایش زمان واقعی موقت

برنامه پایش زمان واقعی موقت در برج با همکاری دانشگاه نوتر دام با اهداف زیر اجرا شد 1- پایش سطح شتاب و لرزش طی ساخت و ساز برای شناسایی سیستم برج 2- سیستم جی پی است کامل متشکل از یک نورد در طبقه 138 و ایستگاه ثابت در طبقه اداری برای اندازه گیری جا به جایی با گذشت زمان و 3- ایستگاه هوا شناسی

برای اندازه گیری دما، رطوبت و سرعت باد و جهت باد در طبقه 138. پیکر بندی دقیق سیستم پایش موقت در شکل 14 نشان داده شده است.

اگرچه جا به جایی های ناشی از بار باد در سرتاسر دوره ساخت کوچک بود، در 10 سپامبر 2008، برج تحت تاثیر زلزله های دور دست در بند عباس ایران به فاصله 850 کیلومتری از تهران قرار گرفت. طی این دوره، زلزله ثبت شده و ساختمان های بسیاری از در زمان زلزله تخلیه شدند. شکل 14، حرکت اندازه گیری شده برج را در طبقه 139 نشان می دهد. لرزش ها و شتاب های اوج مشاهده شده به ترتیب 2.7 و 3.82 milli-g در جهات ایکس و ایگرک بودند. چون برج هیچ گونه شتاب سنجی را در پی نداشت، انالیز زمان واقعی انجام نشد. طی این روند، برج دارای بیشترین لرزش ثبت شده از زمان نصب برنامه پایش بود.

علاوه بر لرزش ساختمانی ثبت شده و جا به جایی های نشان داده شده در شکل 14، شناسایی کامل سیستم برای برج صورت گرفته و در بر گیرنده برآورد فرکانس های طبیعی برج و میرایی بود. مقایسه بین فرکانس های طبیعی پایش بینی شده از مدل عناصر محدود سه بعدی توسط محقق و فرکانس های اندازه گیری شده 2 تا 3 درصد بود. برنامه پایش زمان واقعی موقت توسط شرکت سامسونگ با همکاری دانشگاه نوتردام صورت گرفته و سپس در برنامه پایش سلامت سازه ای تمام مقیاس کنجانده شد که در تاریخ ساختمان ها و سازه های بلند بی سابقه بود.



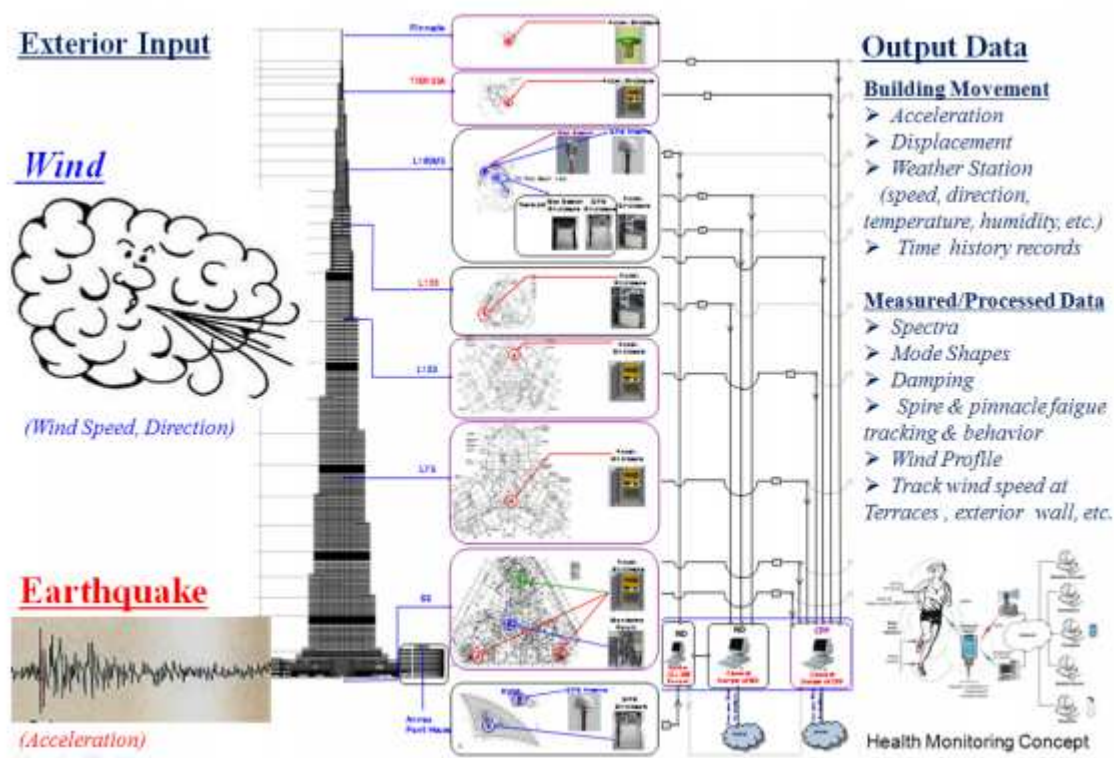
شکل 14: خلاصه ای دقیق از پیکر بندی برنامه پایش زمان واقعی موقت و جا به جایی ساختمان طی ساخت و ساز به دلیل زلزله 1008 در ایران

3.2.2 شبکه و برنامه پایش سلامت سازه ای زمان واقعی تمام مقیاس داریم

فصل پایانی پایش سیستم سازه ای در برج خلیفه، مربوط به نصب و راه اندازی برنامه پایش سلامت سازه ای متشکل از 1- سه جفت لرزه و شتاب سنج در طبقه پی برج برای ثبت شتاب ها و لرزش ها 2- شش جفت شتاب سنج در طبقات 73، 123، 155، در بالای بتون، 160M3، Tier23A و بالای منار برای اندازه گیری همزمان لرزش و شتاب در همه طبقات 3- یک سیستم موقعیت یاب جهانی برای اندازه گیری جا به جایی ساختمان در طبقه 4- 23 م3 160 سونومتر در همه تراس ها و طبقات برون زده از جمله در راس منار در 828 متری سطح زمین برای اندازه گیری سرعت و جهت باد قرار داده شدند 5- ایستگاه هواشناسی در طبقه M3160 برای اندازه گیری، سرعت و جهت باد، رطوبت نسبی و دما. این برنامه نهایی SHM به سیستم موقت برای پایش رفتار ساختمانی طی ساخت و ساز داده شده و با همکاری سامسونگ، دانشگاه نوتره دام و موسسه آزمایش تونل بادیدر سرماک پتراکا ایجاد شد. برای کسب جزئیات بیشتر در رابطه با مفهوم برنامه SHM به شکل 15 مراجعه شود.

از زمان تکمیل نصب برنامه SHM در برج خلیفه، بیشتر خصوصیات سیستم سازه ای شناسایی شده و شامل اندازه گیری زیر بودند

- لرزش ساختمان در همه طبقات
- جا به جایی ساختمان در طبقه 160M3
- پروفیل باد در امتداد ارتفاع به خصوص جهت و سرعت باد که نیاز به کالیبراسیون برای تنظیم سرعت باد دارد.
- فرکانس های دینامیک ساختمان از جمله حالت های بالاتر
- میرایی مورد انتظار ساختمان با دامنه پایین به دلیل رویداد های لرزه ای و بادی
- ثبت تاریخ های زمانی در پایه برج



شکل 15- خلاصه ای دقیق از مفهوم برنامه پایش سلامت سازه ای زمان واقعی داریم که توسط نویسنده برای برج خلیفه ارائه شده است.

مقایسه بین رفتار ساختمانی پیش بینی شده و پاسخ اندازه گیری شده عالی بوده است. اگرچه این یافته ها را نمی توان در این جا به دلیل محرمانه بودن آورد، شکل 16، نمونه ای از داده های اندازه گیری شده در زمان واقعی در برج خلیفه را طی زلزله 5.8 ریشتری رخ داده در ایران در تاریخ 20 ژوئای 2010 در اختیار می

گذارد. اگرچه بزرگی این زلزله در دویی بسیار کم بود، این زلزله فرکانسی داشت که منطبق با فرکانس اوج بود طوری که هر دو به یک رزونانس رسیدند. تاریخ ثبت شتاب و لرزه در پایین ترین سطح برای انجام یک تحلیل تاریخ زمان استفاده شده و جا به جای پیش بینی شده برج در شکل 16 در همه سطوح پایش شده نشان داده شده است.

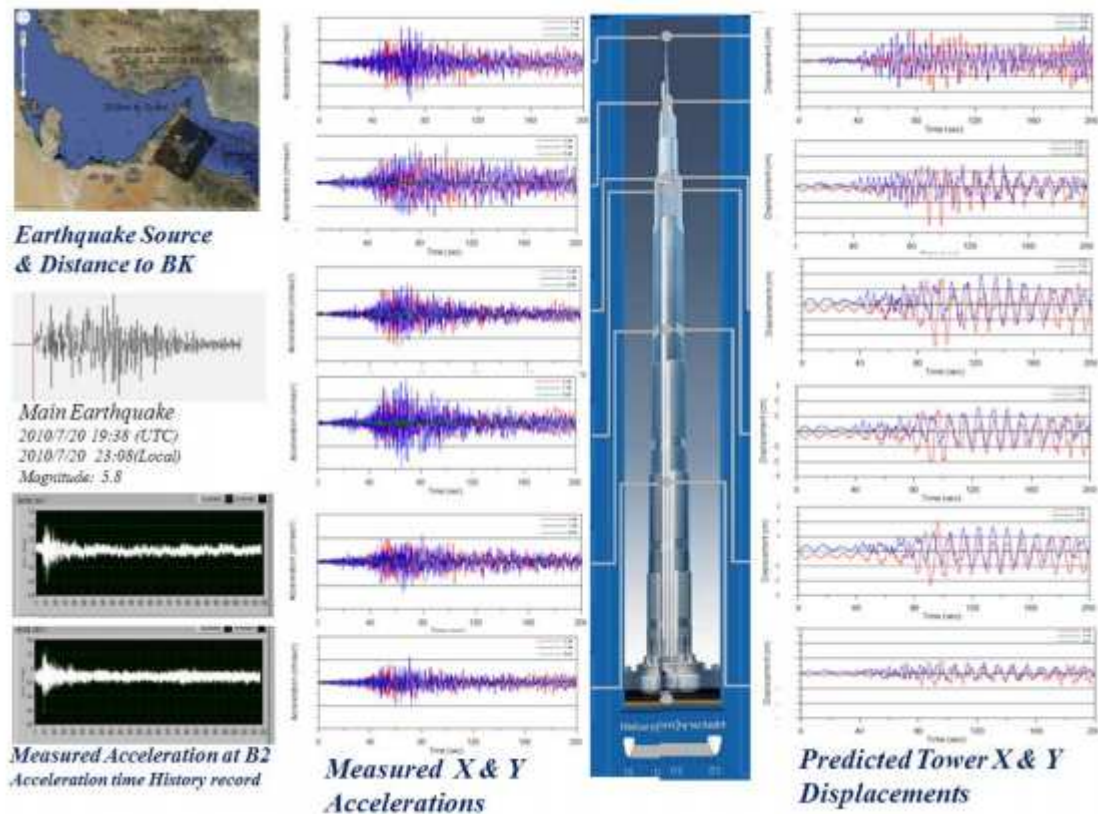
4- نتیجه گیری

عرفا، طراحی و ساخت سازه های بزرگ تنها به رعایت اصول مکانیکی، مدل های مقیاس بندی شده، تحقیقات و تجربه ها و ملزومات کد و قوانین ساختمانی بستگی دارد. اگرچه بسیاری از برنامه های پایش و تحقیقاتی در سازه های بزرگ صورت گرفته است، این برنامه ها کم تر مطالعه شده و ارزیابی نشده اند.

مشارکت نویسنده این مقاله در 1- توسعه سیستم های سازه ای و پی برای برج خلیفه و نیز در SOM، 2- در توسعه روش های ساخت و طراحی برج همراه با سامسونگ، 3- تداوم دست یابی به گرانت های علمی ملی آمریکا برای برنامه پایش در ساختمان ها تحت نیروی باد با همکاری دانشکاه نتر دام و SOM و در نهایت -4- علاقه نویسنده به درک و بازتاب عملکرد سازه برج خلیفه با تایید خصوصیات مصالح بتونی، فرضیات طراحی، و فرضیات و روش های مدل سازی، منجر به ایجاد یک برنامه پایشی و SHM شد که بازخورد های مستقیم و فوری در مورد عملکرد سازه ای واقعی برج از زمان شروع ساخت و ساز داشت. توسعه برنامه های نظارت سلامت سازه ای جامع در برج خلیفه شامل موارد زیر بود

- تست همه گرید های بتون برای تایید خصوصیات مکانیکی بتون (مقاومت، مدول کشسانی، انقباض و خزش، دوام، دمای هیدراسیون)
- برنامه های پایش پیمایشی برای اندازه گیری نشت پی، کوتاه شدگی ستون و حرکات جانبی برج از مرحله اولیه ساخت و ساز تا زمان تکمیل سازه
- برنامه پایش کرنش برای اندازه گیری کرنش های واقعی در ستون ها، دیواره ها و نزدیک سطح داربست برای تایید انتقال بار به ستون های بیرونی
- برنامه پیمایشی برای اندازه گیری کجی ساختمان در زمان واقعی و استفاده از فناوری جی پی اس در روش های پیمایشی

- برنامه SHM زمان واقعی موقت با همکاری دانشگاه نوتردام برای اندازه گیری جا به جایی، لرزش ساختمان و ارایه بازخورد های واقعی در خصوص خصوصیات دینامیکی برج و رفتار آن طی ساخت و قبل از تکمیل سازه
- برنامه پایش سلامت سازه ای دایم با همکاری دانشگاه نوتردام و CPP برای اندازه گیری لرزش، جا به جایی، خصوصیات دینامیکی، ثبت تاریخ زمان لرزش و کجی پی در قاعده، پروفیل سرعت باد در امتداد ارتفاع کل، ایستگاه آب و هوایی و رفتار خستگی منار



شکل 16: نمونه ای از شتاب اندازه گیری شده در همه طبقات و جا به جایی های پیش بینی شده در همه سطوح به دلیل یک رویداد زلزله در ایران

داده های اندازه گیری شده جمع آوری شده از برنامه های SHM و پیمایشی فوق هم خوانی خوبی با رفتار سازه ای پیش بینی شده سامسونگ داشتند. برنامه های پیمایشی و SHM توسعه یافته برای برج خلیفه دارای موارد زیر است

- اعتبار سنجی و ارزیابی فرضیات طراحی و پارامتر های مورد استفاده در طراحی، تحلیل و روش های ساخت و ساز

- ارایه اطلاعات زمان واقعی در خصوص پاسخ سیستم سازه ای و امکان اصلاح روش های ساخت و ساز برای اطمینان از عملکرد مورد انتظار طی ساخت و ساز
 - شناسایی ناهنجاری ها در مراحل اولیه و امکان استفاده از روش هایی برای برطرف کردن آن ها
 - تولید داده های عظیم برای مصالح بتونی مورد استفاده در برج
 - ارایه بازخوردی در مورد رفتار سیستم سازه و پایه و خصوصیات آن از زمان شروع ساخت
- برنامه های پایش و نظارت سلامت سازه ارایه شده برای برج خلیفه ، در استفاده از مفاهیم برنامه نظارت سلامت سازه به صورت بخشی از مفهوم طراحی سازه ها پیشرو بوده است و مدلی برای برنامه های پایش آینده برای همه تاسیسات ضروری و حیاتی است. با این حال، پیشرفت در فناوری های آی تی و رایانه، پیشرفت های جدید در سنسور های فیبر نوری، فناوری نانو، ابزار های پایش دینامیک، فناوری سیستم جی پی اس جدید و فنون پایش بی سیم پایه و اساس برنامه های پایش سلامت سازه ای و پیمایش های آینده بوده و بخش لاینفک طرح های سازه ای و سیستم مدیریت اطلاعات ساختمان می باشند.



این مقاله، از سری مقالات ترجمه شده رایگان سایت ترجمه فا میباشد که با فرمت PDF در اختیار شما عزیزان قرار گرفته است. در صورت تمایل میتوانید با کلیک بر روی دکمه های زیر از سایر مقالات نیز استفاده نمایید:

لیست مقالات ترجمه شده ✓

لیست مقالات ترجمه شده رایگان ✓

لیست جدیدترین مقالات انگلیسی ISI ✓

سایت ترجمه فا ؛ مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده از نشریات معتبر خارجی