

بنام خدا

تحکیم سردر ساعت و نقاره خانه در حرم مطهر امام هشتم (ع)

مهندس مهدی عزیزیان

مهندسان مشاور آستان قدس رضوی، رئیس هیئت مدیره

تلفن 88088858، نمابر: 8806545، پست الکترونیکی MAzizian@reorazavi.org

دکتر محمود گلابچی

مهندسان مشاور آستان قدس رضوی، استاد دانشکده معماری دانشگاه تهران

تلفن 88088858، نمابر: 88086545، پست الکترونیکی golabchi@ut.ac.ir

دکتر پیمان همایی

مهندسان مشاور آستان قدس رضوی

تلفن 88088858، نمابر: 88086545، پست الکترونیکی: Homamip@modares.ac.ir

1- چکیده

طرح توسعه حریم حرم مطهر امام رضا (ع) با هدف احداث فضاهای مورد نیاز بمنظور تأمین نیازهای جمعیت میلیونی زائرین و مجاورین شریف در محدوده ای با وسعت هفتاد هکتار از اواسط دهه 1360 آغاز شده است. موانع و مشکلات متعدد اجرایی، تکمیل اهداف توسعه ای این طرح را به تأخیر انداخته است. وجود ابنیه تاریخی و ضرورت ساخت و ساز در مجاورت آنها یکی از این مشکلات است. در این مقاله مسائل مربوط به ساختمانهای 400 ساله سردرهای ساعت و نقاره خانه در حرم مطهر امام هشتم (ع) مرور میشود. برای احداث شبستان در دو سمت این ساختمانها حفاری های وسیعی باید انجام می گرفت که پایداری این سردر ها را به مخاطره می انداخت. نتیجتاً "مطالعات مربوط به تحکیم این ساختمانها انجام پذیرفت و ضمن طرح سازه، روش مناسب اجرا انتخاب شد و با استفاده از شبکه ای از ابزارهای دقیق رفتارنگاری، در کلیه مراحل حفاری و اجرا، شرایط ایستایی و پایداری سردرها، تحت کنترل قرار گرفت. با این اقدامات، علاوه بر بهبود شالوده این ساختمانها، سه راهرو جمعا" با سطح مقطع حدود 100 متر مربع برای ارتباط بین شبستانهای طرفین، در زیر هر یک از سردرها احداث شد

2- کلید واژه ها

ساختمانهای تاریخی، مقاوم سازی، رفتارنگاری

3- مقدمه :

افزایش تعداد زائرین و کوچک بودن فضای عبادتی در اطراف حرم مطهر امام رضا (ع) که در مرکز بافت قدیمی شهر مقدس مشهد واقع شده است، مسئولین آستان مقدس رضوی را برآن داشته است که با تملک اراضی اطراف حرم مطهر و بازسازی گسترده در این محدوده، امکانات جدید خدماتی و فضاهای مسقف عبادتی و صحنها و غرفات مورد نیاز و در خور زائرین را تأمین نمایند. علاوه بر این، توسعه زیر سطحی در مجموعه ساختمانهای قدیمی نیز مورد توجه قرار گرفته است و برخی از صحنها و بستها که در ایام مذهبی و مناسبتها، محل ازدحام جمعیت می باشند در حال حاضر

دارای زیر زمین هستند. کلیه فضاهای جدید نیز با تزیینات بی نظیر مزین شده و تفاوتی بین رواقهای تراز همکف و زیر زمینها مشاهده نمی شود.

موضوع حائز اهمیت در طرح توسعه حرم مطهر، تداخل فضاهای جدید با ابنیه قدیمی است. خاکبرداری در کنار ساختمانهای موجود (که عمدتاً "تاریخی و آجری هستند) دقت و حساسیت زیادی را ایجاب میکند. در کلیه پروژه های مورد بحث، طرح سازه نگهبان و پی سازه های جدید طوری انجام شده است که تغییر شرایط مرزی برای پی ساختمان قدیمی هیچگونه نشستی را موجب نشود.

در پروژه تحکیم سردرهای ساعت و نقاره خانه، علاوه بر احداث زیر زمین در بستهای شیخ طوسی و شیخ حر عاملی، که به این سردرها منتهی میشوند، راهروهای ارتباطی بین زیر زمینهای طرفین سردرها نیز از زیر این سردرها عبور داده شده اند. چنین اقدامی در پروژه های مشابه سابقه نداشته و لذا کنترلهای مضاعفی را مطالبید که در این مقاله به آنها اشاره می شود.

4- معرفی ساختمان سردرها :

سردر ساعت و سردر نقاره خانه بترتیب در ضلع غربی و شرقی صحن عتیق بنا شده اند و قدمت آنها به دوره صفویه باز می گردد [1]. این سردرهای باشکوه دارای ابعاد تقریباً مشابه هستند و عرض کل هر سردر شامل ورودی اصلی و دو راهرو در طرفین آن حدود 28 متر و ارتفاع بام آنها بجز برج ساعت و برج نقاره خانه حدود 18 متر و طول راهروی آنها 17 متر می باشد. ساختمان سردرها بر روی پی آجری و گسترده قرار گرفته است که عمق آن بطور متوسط 2/5 متر است و در زیر پایه های اصلی (طرفین ورودی اصلی) عمق پی بیشتر شده است و به 4/5 متر میرسد. در سالهای متمادی، نمای این سردرها تعمیر شده و آثار ترکها و خسارات احتمالی که طی این سالها تجربه کرده اند، از بین رفته است و قابل باز شناسی نیست. برجهای ساعت و نقاره خانه بتنی که امروز وجود دارند قدمتی کمتر از 50 سال دارند و حین عملیات بازسازی و تعمیرات این سردرها، جایگزین برجهای چوبی قبلی شده اند. از دیگر تغییراتی که در این ساختمانها بعمل آمده است، بازسازی بام آنها برای احداث برجهای جدید بر روی آن است. در حال حاضر بام این سردرها، یک دال بتنی است که ستونچه هایی برای نگهداری برجهای ساعت و نقاره خانه در زیر دال تعبیه شده اند که این ستونچه ها بر روی بخشهایی از جرز توپر آجری و یا قوسهای باربر آجری در زیر متکی شده اند.



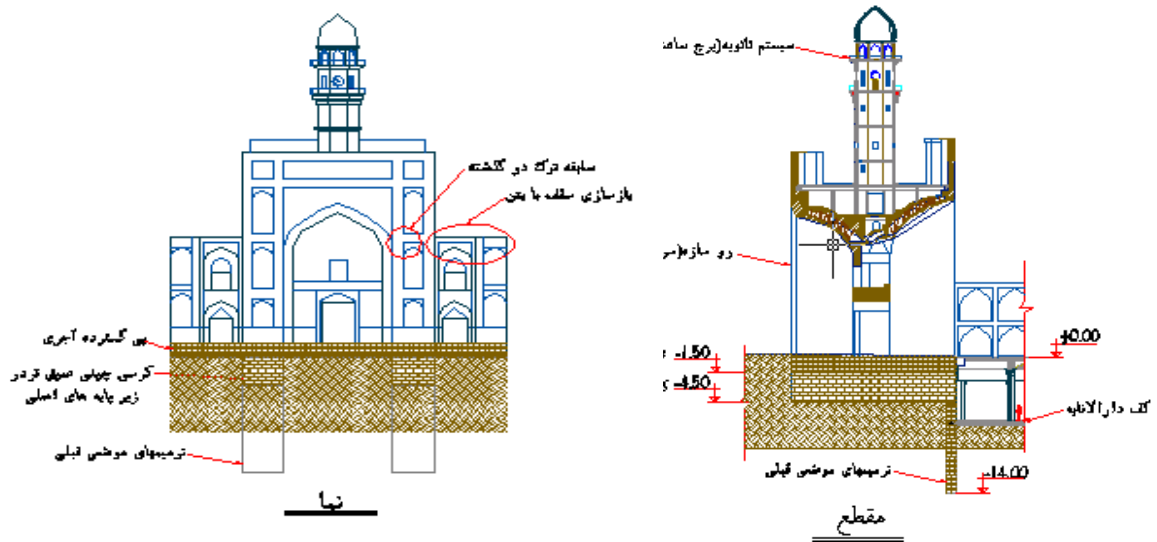
شکل (1) - نمای سردر ساعت از بست شیخ طوسی



شکل (2) - تصویر سمت چپ برج چوبی ساعت در دهه 1320 را نشان می‌دهد و تصویر سمت راست نمای فعلی سردر با برج جدید را نشان می‌دهد



شکل (3) - تصویر سمت چپ نمای جانبی برج ساعت و تصویر سمت راست نمای جانبی برج نقاره خانه را نشان می‌دهند این نماها از سطح صحن برای زائرین شریف غیر قابل رؤیت هستند



شکل (4) - تصاویر نما و مقطع برج ساعت

5- ارزیابیهای اولیه :

با طرح موضوع توسعه زیر زمین بست شیخ طوسی و شیخ حر عاملی و لزوم ایجاد ارتباط در زیرزمینها و احداث راهرو در زیر سردرها، ابتدا امکان سنجی طرح انجام شد و برداشت وضع موجود آغاز گشت. مسائل خاص که در بدو امر اهمیت و پیچیدگی مسأله را بیان می کردند عبارت بودند از:

- قدمت بنای سردرها و ارزش معنوی آنها
- وجود آسیبهای قبلی ناشی از نشست و زلزله
- حجیم و سنگین بودن ساختمانها و آجری بودن آنها
- نامشخص بودن جزئیات ساختمانها اعم از مصالح و اجزای تشکیل دهنده پی و جرزها و

غیره

- قرارگیری در مسیر اصلی تردد زوار و بهره برداری شبانه روزی از ساختمانها

در بخش شناخت وضع موجود اقدامات زیر بانجام رسید:

- تهیه نقشه های وضع موجود و خسارتهای قبلی :

برداشت کامل جزئیات وضع موجود این ساختمانها هر یک حدود دو ماه بطول انجامید که علت طولانی شدن آن، پیچیدگی ساختمان و محدودیت کار در ساعات خاص بود. برای شناسایی خسارتهای قبلی اشاره شد که تعمیرات نما باعث مخدوش شدن اطلاعات شده است و بنابر این، فقط ترکهایی در سطوح داخلی و فضاهای خالی داخل بنا قابل شناسایی و ردیابی بودند که هم در

بخش فوقانی ساختمانها مشاهده شدند و هم در بخش پی ترکهایی رؤیت شد. در منابع تاریخی نیز اشاراتی به کیفیت خسارات ناشی از حوادث زلزله شده است که آنها نیز جمع آوری شدند، در این منابع مهمترین خسارات به زلزله سال 1327 اشک آباد منسوب شده است که در شرح خسارات ناشی از آن زلزله در حرم مطهر آمده است: " این زمین لرزه سبب خراب شدن سردرهای صحن و ایوان و گلدسته‌های مسجد گوهرشاد مشهد شد. در سردرهای صحن عتیق شکاف‌هایی ایجاد شد و یکی از حجره‌های مسجد جامع مشهد نیز خراب شد ". برای تهیه اطلاعات از طرق دیگری همچون مصاحبه با افراد بازنشسته که دست اندر کار نگهداری ساختمان بودند هم استفاده شد و ایشان برخی از خساراتی که قبلاً مشاهده شده است را بازگفتند که بسیار مفید بود.

- تهیه تاریخچه بنا و مرمت‌های پیشین:

داشتن اطلاعات مربوط به تاریخچه بنا برای شناسایی تنوع مصالح مصرفی و تشخیص اصل بنا از الحاقات کمک شایانی می‌کند ضمن اینکه دانستن سابقه مرمت‌های پیشین، نقاط ضعف و نا همگونی های ساختمان را هم نشان می‌دهد. متأسفانه اغلب این اطلاعات بدلیل عدم مستند سازی تعمیرات در ادوار مختلف بطور کامل قابل بازیابی نیستند.

- انجام آزمایشات مکانیک خاک

با حفر چاههای شناسایی به عمق 25 متر مشخصات لایه های خاک محل شناسایی شدند.

- شناسایی پی ساختمان و مصالح آن

با انجام سونداژ در نقاط مختلف پی که در مسیر تردد نبودند و در زیر زمین صحن عتیق (صحن انقلاب اسلامی) ابعاد هندسی و مصالح آجر و ملات پی شناسایی شدند. تنوع در مصالح پی قابل ملاحظه بود و در زیر پایه های اصلی از مصالح بهتر و مقاومتر استفاده شده است پس از جمع آوری اطلاعات، ارزیابی های کلی بانجام رسیدند و ظرفیتهای پی ساختمان سردرها هم در شرایط فعلی و هم با فرض احداث زیر زمین بستهای مجاور محاسبه شدند. ارزیابیها از چهار بخش تشکیل شدند [2] و [3]:

- ظرفیت باربری پی

- واژگونی ساختمان در اثر زلزله

- لغزش

- گسیختگی گوه خاک

البته ابهاماتی نیز در تعیین این ظرفیتهای وجود داشت مثلاً " تأثیر پیوستگی ساختمان سردرب با رواقهای مجاور، از اینرو برای تخمین بازه تغییرات ظرفیت و تعیین پوش محافظه کارانه نتایج، با

در نظر گرفتن چند وضعیت مختلف شامل حالت‌های حدی که این پیوستگی تأثیرگذار باشد یا بی تأثیر فرض شود، محاسبات انجام شدند. از این عوامل سعی در بعمل آمد.

نتیجه این ارزیابیها، حاکی از وجود نقاط ضعف بالفعل و بالقوه ای بود که باید جدای از موضوع توسعه زیر سطحی و احداث راهروها برطرف می شدند و در واقع انجام پروژه بست طوسی و بست حر عاملی زمینه خوبی ایجاد نمود تا پی سردرهای قدیمی نیز تحکیم شوند.

از سایر اطلاعاتی که بدست آمدند نیز روشن شد بجز پی، بخشهای دیگر برجهای ساعت و نقاره خانه باید بهسازی شوند. این موضوعات در دستور کار قرار گرفته اند و در حال حاضر پروژه ادامه دارد. در این مقاله فقط مسائل مربوط به پی ارائه شده اند.

- برای رسیدن به اعداد و ارقام کاملاً دقیق به داده های دقیق و کامل و روابط نظری و ابزار(نرم افزار) کامل نیاز داریم، در حالیکه چنین امکاناتی برای تعیین ظرفیت ساختمان و پی مورد بحث بطور کامل توسعه پیدا نکرده اند و تقریبی بودن اطلاعات و تئوریه‌ها در چنین بحث هایی آنقدر است که قابلیت اعتماد به آنها ممکن است از روشهای تقریبی همراه با قضاوت‌های مهندسی بیشتر نباشد.

6- بررسی گزینه های اجرایی و طراحی :

شرایط اجرا، امکانات اجرایی و وضع موجود، انتخاب سیستم سازه ای را تحت تاثیر قرار می دهند . ایده آلهای طراحی و اجرایی که در انتخاب روش اجرا و نتیجتاً "سازه تحکیم مؤثر بودند ذیلاً" اشاره شده اند:

- اندرکنش سازه جدید (تقویتی) و قدیم موجب افزایش پاسخهای سازه قدیمی نشود.
- حتی المقدور روش اجرا مانع تردد زوار نباشد و یا درمدت زمان کوتاهی انجام شود .
- ترجیحاً خاکبرداری بگونه ای باشد که امکان بازدید از پی قدیمی فراهم باشد و همچنین فضای مناسب برای اجرای هر نوع تقویت و ترمیم تأمین باشد .
- خاکبرداری با روشی انجام شود که تا حد ممکن انعطاف پذیر باشد طوریکه ضمن رعایت احتیاط درهنگام توسعه خاکبرداریها ، در صورت برخورد به موانع و پی قدیمی سازه امکان اتخاذ تصمیمات مناسب فراهم باشد.
- روش پیشنهادی متناسب با امکانات اجرایی و فنی قابل دسترس باشد .
- هزینه پروژه قابل قبول باشد .

با این توضیحات گزینه های مورد بررسی عبارت بودند از [5] و [4]:

الف) اجرای شمعهای مجاور هم دور تا دور پایه ها و اتصال شمعهای روبروی هم در خاکبرداریها

ب) حفاری مستقیم تونل در مسیر راهروها در زیر سردر

ج) حفاری بصورت کانال و سپس اجرای دیواره راهرو
د) روش تونل فشاری:

در این روش یک لوله فلزی از قبل ساخته شده توسط نیروی جک ها داخل خاک فشار داده می شود و سپس اقدام به خاکبرداری داخل لوله می نمایند. این روش در احداث زیر گذر در جاده های کشور سوئد استفاده شده است.

ه) روش استفاده از میکرو پایل:

در این روش با اجرای تعدادی ریز شمع با قطر حدود 15 سانتی متر در نزدیکی یکدیگر (بجای یک شمع با مقطع بزرگ) لایه های خاک با شالوده ساختمان دوخته شده و گسیختگی برشی خاک منتفی میشود.

و) ترکیب روش الف و ب:

ابتدا با اجرای شمع های مناسب اقدام به تحکیم پی گردد و سپس با احداث تونل راهروی ارتباطی اجرا شود.

ز) ترکیب روش الف و ج:

با توجه به مزایای روش (ج) برای برطرف کردن معایب آن می توان از شمعهای بتنی کم تعداد در دور تا دور پایه ها بعنوان قطعاتی که ضمن مهار خاک دیواره بتوانند در سیستم باربرنهایی هم نقش بازی کنند استفاده کرد.

روش انتخابی:

روش ترکیبی (الف - ب) در مقایسه با سایر روشها خصوصاً از جنبه اجرایی به ایده آلهای ذکر شده در ابتدای بحث نزدیک تر تشخیص داده شد، از اینرو بعنوان گزینه انتخابی، کار تحلیل و طراحی برای چنین سیستمی دنبال شد.

پیکربندی سازه تحکیم و عملکرد سازه آن بشرح زیر می باشد:

- از 24 شمع با عمق 25 متر دور تا دور پایه های اصلی استفاده شده است که وظیفه اصلی تحمل بارها بعهده آنهاست.

- این شمعها حتی المقدور در نقاطی مستقر شده اند که حداکثر اندامان ردا داشته باشد و کمترین خسارت را به دیوارهای سازه موجود وارد کنند.

- از تعدادی بارت بعنوان حائلهای نگهدارنده خاک در زیرزمین های طرفین سردرب و بین شمعها استفاده شده است.

- مجموعه بارتها و شمعها، صندوقه ای در اطراف خاک زیر پایه های اصلی سردر درست کرده اند که وزن سردر را به لایه های عمیق خاک منتقل می کند.

- با محصور کردن خاک زیر پایه ها، ظرفیت باربری آن افزایش یافته، اجازه نشست به خاک داده نمیشود.
- امتداد شمعها در یک راستا قرار داده شده اند تا همراه دیواربرکننده بین آنها قابهای برشی مقاوم را شکل می دهند.
- بجز شمعهای دور پایه های اصلی از شمعهای دیگری در دو انتهای سردرب برای تحکیم دیوارها و جلوگیری از نشست سازه های مجاور استفاده شده است.
- با اجرای تیرهای سرشمعها و دال کف یک دیافراگم صلب مناسب برای یکپارچه کردن حرکات شمعها، انتقال و توزیع بهتر نیروهای جانبی فراهم شده است.
- با پیش بینی ورقهای فولادی روی شمعها امکان توسعه سازه تقویت کننده سردرب درروی پی فراهم شده است.

7- مدلسازی و طراحی:

با توجه به عملکرد مورد انتظار از مجموعه پی سازه، تحلیل رفتار بصورت ارتجاعی و خطی مورد توجه قرار گرفت. اگر چه مدل‌های غیرخطی با کمک نرم افزار ANSYS تهیه و بررسی شدند اما بدلیل حساسیت این مدل‌ها به پارامترهای تعریف رفتار غیر خطی در مصالح آجری و در محیط خاک زیر سازه، که تعیین آنها با ابهامات زیادی همراه هستند، طراحی‌ها با مدل‌های خطی و ساده شده ای بانجام رسید. بمنظور بررسی رفتارهای خطی مدل‌های ساده ای از سازه تحکیم و بارهای وارد بر آن تهیه شد و کلیه مدهای خرابی و سناریوهای خرابی که محتمل بودند شبیه سازی شدند. در این مورد از نرم افزار SAP ۲۰۰۰ استفاده شد که قابلیت مدلسازی سازه تحکیم متشکل از شمع، تیر و دال را دارد و برای تحلیل‌های خطی کفایت می کند. لازم به توضیح است استفاده از مدل‌های پیچیده ولی پر ابهام، تفسیر نتایج تحلیل و قضاوت مهندسی را مشکلتر می سازد و اگر امکان تهیه مدل‌های ساده بنحوی فراهم شود که رفتارهای کلی سازه را با اطمینان نمایش دهد برای طراحی مفیدتر است و صرفاً "امکان داردطراح با کمبود اطلاعات تحلیل بطور موضعی و در نقاطی از سازه مواجه شود که میتواند آنها را با مدل‌های تکمیلی و یا با فرض حاشیه ایمنی مناسب تعیین تکلیف نماید.

برای ساده سازی مدل سازه تحکیم سردر، همانطور که فوقاً اشاره شد، المانهای سازه تحکیم مدل شدند و پی سازه موجود و سازه آجری روی آن، بطور مستقیم در مدل وارد نشده اند بلکه اندرکنش سازه موجود با سازه تحکیم با فرضیاتی بشکل ساده در مدل در نظر گرفته شده است. به این منظور فنرهای خطی در اطراف شمعها و بارت‌هایی که با سازه موجود در تماس بودند، به مدل اضافه شده اند. این فنرها صرفاً " برای انتقال فشار فعال در نظر گرفته شده اند و بنابر این، با تحلیل‌های تکراری و حذف

فهرهای کششی، مدل‌های ساده مورد نظر تهیه شده است و مورد استفاده قرار گرفته است. تعیین مقادیر سختی فهرهای مورد بحث نیز بر اهمیت است چراکه پاسخ سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بنابراین با در نظر گرفتن محدوده ای از سختیهای متعارف و ساخت مدل‌های مستقل با هر یک از این مقادیر، اثر تغییرات سختی فهرها شبیه سازی شده است و پوش اثرات آنها برای طراحی مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، با تهیه چند مدل تکمیلی، تلاشهای درونی سازه بطور موضعی بررسی شدند، بعنوان نمونه فرض شد در حین اجرا، بخشی از شمعها باربری مورد انتظار را تأمین نکنند و باز توزیع تلاشها در بخشهای مجاور رخ دهد، بدین ترتیب اعضای سازه برای تلاشهای افزایش یافته ناشی از این موضوع، طرح شده اند.

با در اختیار داشتن مجموعه اطلاعات بدست آمده از تحلیلهای متعدد، مبانی نظری و اطلاعات لازم، تکمیل شده است و طرح سازه مورد نظر به مرحله عمل در آمده است. همزمان با طرح سازه تحکیم و بدلیل اهمیت سازه سردر، صرفاً "به مبانی نظری اکتفا نشده است و به دلیل نبودن تجربه عملی در خصوص اجرای چنین پروژه ای، ضروری تشخیص داده شد که اقدامات تکمیلی برای جمع آوری اطلاعات و کنترل سازه در حین و بعد از اجرای طرح پیش بینی شود که مجموعه این اقدامات تحت عنوان رفتار سنجی، باختصار تشریح شده است.

8- - رفتارسنجی ساختمان سردرها

تعدد عوامل موثر بر اندرکنش سازه سردر و اعضای سازه تحکیم، همچنین ابهام در رفتار توده خاک و عدم شناخت قطعی آنها و نیز طبیعت پیچیده لایه های خاک، پیش بینی و مدلسازی رفتار خاک و پی زیرسردرها را از دیدگاه نظری بسیار مشکل می نمود از اینرو ارزیابی رفتار واقعی یا عبارت دیگر رفتار سنجی الزام پیدا می کرد. رفتار سنجی در سه بخش متمایز قابل استفاده میباشد که عبارتند از [6]:

- رفتارسنجی قبل از اجرا (برای تعیین پارامترهای طراحی)
 - رفتار سنجی حین اجرا (برای کنترل ایمنی و روش طراحی)
 - رفتارسنجی بعد از اجرا و هنگام بهره برداری (برای پیش گیری مخاطرات احتمالی)
- اهداف رفتارسنجی را بطور اجمالی می توان بشرح زیر برشمرد:
- علت یابی مسائل
 - ارزیابی و تأیید صحت پارامترهای طراحی
 - کاهش هزینه اجرا
 - کنترل و بهینه سازی مراحل اجرا
 - پیشبرد دانش و فن آوری
 - بهبود شرایط ایمن اجرای طرح

برتریهای جنبی اقدام به رفتار سنجی عبارتند از :

- تکمیل مدارک برای مستند سازی
- تامین حمایت قانونی

- بالا بردن درک متقابل بین دست اندرکاران طرح و سایر اشخاص

با توجه به موارد فوق و توضیحات بخشهای قبل، نصب ابزارهای مناسب برای رفتار سنجی به اقدامات اجرایی این پروژه اضافه شد. برای اخذ نتیجه مطلوب، برنامه رفتار سنجی بشرح مراحل زیر دنبال شده است :

1-8- انتخاب ابزار مناسب (هر ابزار باید به پاسخگویی پرسشی مشخص کمک کند)

تعداد و تنوع دستگاههای نصب شده در سردر ها بشرح جدول (1) در نظر گرفته شده اند :

جدول (1) - تعداد و تنوع دستگاههای نصب شده در سردر ها

فشارسنج	ترک سنج	انحراف سنج	کشیدگی سنج	
9	5	2	-	سردر ساعت
9	4	2	4	سردر نقاره خانه
-	8	4	3	گنبد طلا

وظایف هر یک از دستگاههای نصب شده در سردر ها بشرح جدول (2) در نظر گرفته شده اند :

جدول (2) - تعداد و تنوع دستگاههای نصب شده در سردر ها

نوع ابزار دقیق	قابلیت ابزار	کاربرد
فشارسنج	نمایش فشار تحمیل شده بر سطح بتن، خاک یا سنگ	- کنترل صحت فرضیات طراحی و نتایج تحلیل شمعها و بدنه و کف راهروها (تونل ها) - امکان شناسایی نشست غیر یکنواخت در کل سازه با مقایسه تغییرات فشار در نوک شمعهای مختلف در گروه شمعهای سازه
ترک سنج	نمایش تغییر عرض ترک	- تعیین فعال شدن و گسترش ترک - تشخیص نحوه توزیع تنشها در سازه - تعیین اثر ارتعاشات محیطی بر عرض ترک - تعیین اثر تغییرات حرارت محیط بر عرض ترک
انحراف سنج	نمایش مقدار زاویه انحراف از امتداد قائم	- تعیین دوران و نشست غیر یکنواخت در سازه - کمک به تفسیر نتایج استخراج شده از فشارسنج ها - تعیین اثر تابش یک جهت خورشید در خمش برج مرتفع - تعیین اثر فشار باد بر خمش برج مرتفع
کشیدگی سنج	نمایش تغییرات طول در عضو یا تغییر نسبی فاصله بین دو یا چند نقطه	- کنترل صحت فرضیات طراحی و نتایج تحلیل شمعها - تعیین اثر نسبی چسبندگی بدنه شمع به اتکای نوک شمع - پیدا کردن مسیر گسیختگی در خاک



شکل (5) - تصویر سمت راست: فشارسنج - تصویر سمت چپ: ترک سنج یک



شکل (6) - نصب کشیدگی سنج در قفس میلگرد شمع



شکل (7) - تصویر سمت راست: انحراف سنج ها - تصویر سمت راست: دستگاه قرائت

8-2- آرایش دستگاههای ابزار دقیق

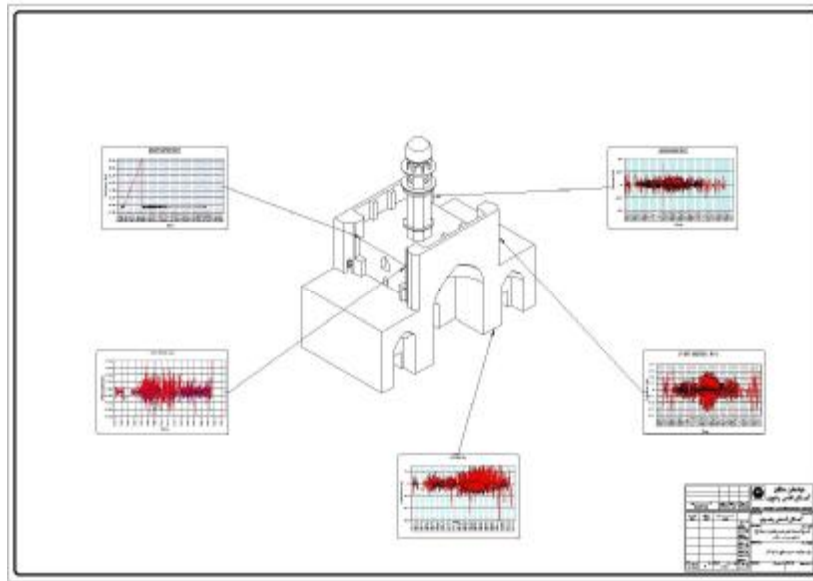
بدیهی است که تعداد و موقعیت نصب دستگاهها بسیار حائز اهمیت است و در اغلب اوقات اطلاعات بدست آمده از یک دستگاه بتنهایی قابل استفاده نیست و مجموعه چند دستگاه و اطلاعاتی که از آنها استخراج می شوند برای تشخیص کامل و صحیح رفتار مورد نیاز است. از سوی دیگر هزینه تجهیز و تهیه دستگاهها نیز مورد توجه است و بنابر این تعداد دستگاهها در حد حداقل لازم تعیین شده است. در چنین شرایطی، سعی شده است که بهترین موقعیت نصب دستگاهها تعیین شوند تا حداکثر اطلاعات ممکن از آنها استخراج شود. به این منظور با توجه به اطلاعات بدست آمده از تحلیل سازه ها، دستگاهها در موقعیتی قرار داده شده اند که انتظار میرفت بیشترین جابجایی یا تنش در آنجا رخ دهد، تا ضمن اینکه بطور موضعی این نقاط کنترل شوند، بطور کلی نیز بتوان از مجموعه اطلاعات چند دستگاه، رفتار کلی سازه را تعیین نمود.

8-3- نصب و بکارگیری ابزار دقیق

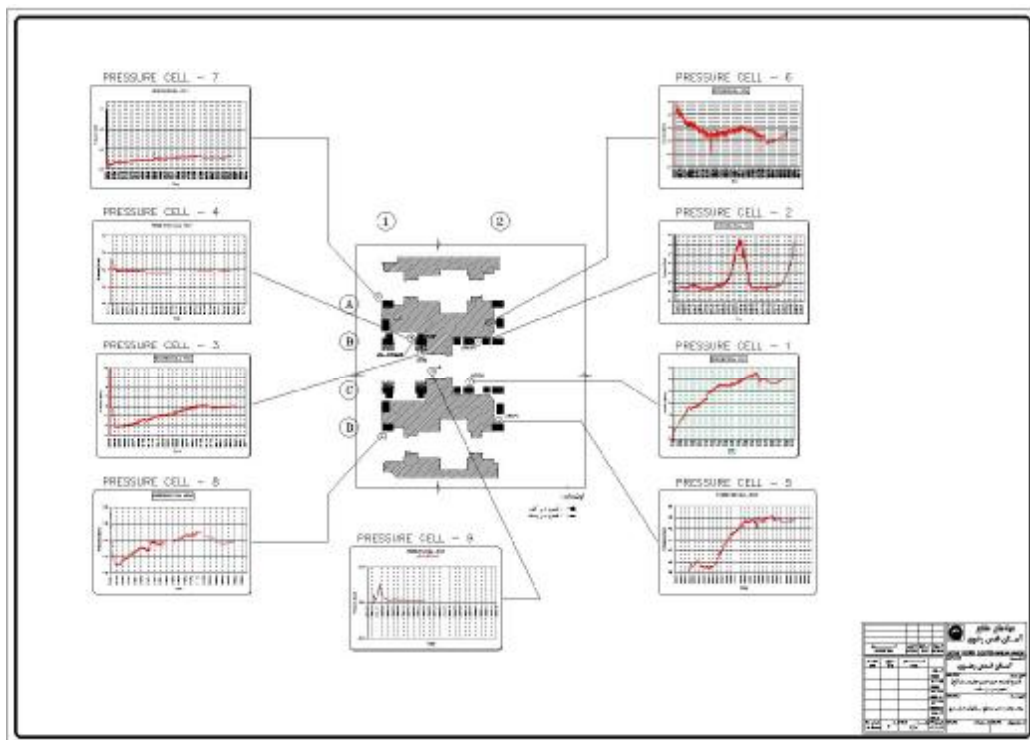
در شکلهای (9) و (10) موقعیت نصب ترک سنج ها و فشارسنج ها در سردر ساعت نمایش داده شده است. انحراف سنجها نیز در بالاترین تراز ها نصب شده اند تا کوچکترین انحراف سازه از محور قائم را تشخیص دهند.

8-3- قرائت

برای ثبت و قرائت اطلاعات دستگاه ها، می توان از دستگاه جمع آوری خودکار اطلاعات (قرائت مرکزی) که به رایانه متصل میشود استفاده نمود و با کمک نرم افزار مربوط به قرائت، فواصل زمانی مناسب برای خواندن و ثبت اطلاعات را تنظیم نمود، همچنین نرم افزار مورد بحث قادر است که اطلاعات قرائت شده را با مقادیر از قبل تعیین شده ای مقایسه نماید و در صورت لزوم، اعلام خطر نماید. استفاده از دستگاه قرائت مرکزی اجباری نیست و در مواردی که در نظر است پاسخ دینامیکی سازه در فواصل زمانی کوتاه ثبت شود، کاربرد دارد و مهمترین مزیت آن فراهم کردن سهولت جمع آوری اطلاعات است. در شروع پروژه تحکیم سردرها، از این دستگاه استفاده نشد و بجای قرائت خودکار، قرائت ها از طریق دستگاه ثبت در محل توسط شخص آموزش دیده و در فواصل زمانی مشخص انجام شده است. با توجه به مراحل اجرای کار فواصل زمانی قرائتها از 12 ساعت تا 48 ساعت تغییر داده شده است. دستگاه قرائت مرکزی که ابزارهای رفتارسنجی سردرها را تحت پوشش قرار میدهد، در حال حاضر تهیه شده است و این دستگاه بخشی از شبکه دستگاههای رفتارسنجی است که در حرم مطهر تعیبه شده است و در حال توسعه میباشد



شکل (8)-موقعیت 5 دستگاه ترک سنج و نمودار اطلاعات قرائت شده در آنها. دامنه تغییرات در حد یک دهم میلیمتر است و شکل نمودار ناشی از تغییرات درجه حرارت است.



شکل (9)-موقعیت نصب 9 عدد از فشارسنج ها و نمودار فشار قرائت شده در آنها در مدت یک سال و نیم. تغییرات آنها متناسب با تکمیل پروژه و توسعه خاکبرداری ها و بارگذاری تدریجی شمعها است.

8-3- پر دازش و تفسیر داده ها

اطلاعات بدست آمده از مجموعه ابزارها در کنار یکدیگر قرار داده شده اند و تفسیر شده اند. این اطلاعات در مستندات پروژه بصورت گزارش های منظم، همراه تفسیرهای کارشناسی به تفصیل ارائه شده اند. بهره برداری عمده از نتایج ابزارهای رفتار سنج بشرح ذیل قابل ذکر است:

8-3-1- عدم توقف اجرا:

- اطمینان از ثبات سازه در حین خاکبرداری و اجرا باعث شد که برخورد به موانع خاص و یا مشاهده ترک در پی قدیمی (که با انجام حفاری ها رؤیت شد) منجر به توقف و یا نگرانی از ادامه کار نشود. زیرا همزمان، نتایج رفتارسنجی حاکی از پایداری کامل سازه بود.

8-3-2- هدایت مراحل اجرا:

- کنترل مراحل توسعه سازه و خاکبرداری ها طوریکه هیچگونه نشست ناهمگون و یا پیچشی در سازه رخ ندهد. بعنوان نمونه در حین حفاری تونل های کناری سردر نقاره خانه مشاهده شد حفاری یک تونل به تنهایی منجر به بروز پیچش جزئی در سازه سردر شده است که بلافاصله منطقه حفاری تغییر داده شد و با شروع حفاری از سمت مخالف مشکل برطرف شد.

8-3-3- ارزیابی نتایج تحلیلی:

- نکات مهم و متعددی از مقایسه اطلاعات ثبت شده از طریق ابزارهای رفتارسنجی و نتایج تحلیل سازه مدل ساده شده استخراج شده است که ذکر کامل و جامع همه آنها از حوصله مقاله خارج است و اختصاراً "به مهمترین آنها اشاره می شود که اختلافی است که بین نتایج تحلیل سازه و نتایج استخراج شده از فشار سنج ها مشاهده شده است. بطور خلاصه باید ذکر نمود که مراحل توسعه خاکبرداری سهم بار نوک شمعها را تا 80 درصد تغییر داده است و عاملی که سازه مورد بحث توانسته است بخوبی عملکرد مورد انتظار را برآورده نماید در نظر گرفتن سناریو های مختلف خرابی سازه تشخیص داده شده است. در سازه مورد بحث، شمعایی که زودتر اجرا شده اند بار بیشتری را تحمل میکنند و سهم بار شمعهای بعدی بتدریج کاهش می یابد، حتی در مورد دو شمع که در نقاط قرینه و نسبتاً مشابه قرار دارند اختلاف بار به حدود 30 درصد میرسد درحالیکه در تحلیل سازه چنین اختلافی مشاهده نمیشود. مدلسازی مراحل اجرا خود از جمله مشکلات تحلیل سازه است و با نرم افزارهای در دسترس، بطور کامل قابل اعمال نیست.

9- جمع بندی

انجام موفق پروژه تحکیم سردرهای ساعت و نقاره خانه و احداث تونلهای ارتباطی از زیر این سردرها، مؤید اتخاذ روشهای مناسب تحلیل و اجرای این پروژه است. در این پروژه نشان داده شده

است، استفاده از تحلیلهای ساده و متعدد اما با دقت بجای تحلیلهای پیچیده و پر ابهام، میتواند اطلاعات مورد نیاز برای طراحی را در اختیار طراح قرار دهد. همچنین نشان داده شده است که عدم وجود تجربه عملی در ارتباط با انجام یک پروژه پیچیده و پر مخاطره، با استفاده مناسب از شبکه ابزارهای دقیق رفتارسنجی در کنار تحلیلهای نظری، قابل جبران است و منجر به سرعت تصمیم گیری و عدم توقف اجرای سازه خواهد شد.

10- تشکر و قدردانی

نگارندگان لازم می دانند مراتب قدردانی و تشکر خود را از مدیریت محترم سازمان عمران و توسعه حریم حرم مطهر امام رضا(ع) که اجازه ارائه و چاپ مطالب این مقاله را داده اند اعلام دارند. همچنین از کلیه عوامل اجرایی پروژه مورد بحث که توصیه های اجرایی را به دقت رعایت نموده اند قدردانی می نماید.

11- مراجع

- 1- عطاردی ع، تاریخ آستان قدس رضوی (جلد اول و دوم) اشارات عطارد - 1371
- 2- داس ب ام، "اصول مهندسی ژئوتکنیک" (جلد اول و دوم) ترجمه طاحونی ش، انتشارات پارس آئین - 1376
- 3- Fang H.Y. , "Foundation Engineering Handbook", 2nd ed., CBS publ. 2002.
- 4- Mandara A., Palumbo G., "Confined Masonary Members: a method for predicting compressive behavior up to failure", Proceeding of the 4th Int. Seminar On Structural Analysis Of Historical Constructions, pp 803-812 Padova Italy , Nov. 2004.
- 5- Bostenaru Dan M.D., "Review Of Retrofit Strategies Decision System In Histori Perspective", Natural Hazard and Earth System Sciences, vol. 4, pp 449-462, 2004.
- 6- سازمان مدیریت و برنامه ریزی، "رفتارسنجی فضاهاى زیرزمینی" نشریه 252 شماره - 1381