دانشنـــــــامــه علــوم فنــی و مهندســی

جلد۱،شماره۱،آذر۱۴۰۲

صفحه ۴۳-۵۲

بررسی تکنولوژی ساخت در بناهای رومی معروف (ازجمله معبد پانتون ، برج پیزا و آمفی تاتر کولسیوم)

۱- نیلوفر ساعی ۲- محمد ابراهیم نژاد

۱- دانشجو دکتری معماری دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد
۲- استاد گروه معماری، دانشکده معماری دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد

niloofarsaei۲۰@gmail.com
ebrahimnejad.un@gmail.com

چکیده:

انسان از دوران ماقبل تاریخ ساختمان ها و سازه های بسیار را ساخته است از جمله پلها آمفی‌تئاتر ها ، جاده ها کانال ها وغیره .که برای ساخت این بنا ها نیازمند ابزار و و روشهای ساخت بوده است در طول دوران مختلف موضوع تکنولوژی ساخت کمک شایانی به مهندسان سازه و معماران کرده است . هدف از پروژه حاضر دستیابی به روش های تکنولوژی ساخت ابداعی توسط سازندگان بناهای معروف رومی بوده .بنابراین با استفاده از روش تحیق توصیفی این بناها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج جالبی از جمله اختراع بتن رومی با استفاده سنگهای خاص منطقه و توفهای آتشفشانی جرثقیل های ابداعی و همچنین قرقره و چرخ ها توسط رومیان بدست آمد همچنین نتایج بدست آمده حاکی از تسلط رومیان بر زدن طاقهای قوسی با استفاده از سنگها منطقه و طراحی تالارها و راهرو ها و پلها با دهانه های بزرگ بود ه است. این تکنیک منجر به ساخت پنجره های تزینی با هلال های قوسی و طاق نماها در نمای ساختمان ها گردید . تا جایی که به دیگر مناطق دنیا نیز انتقال یافت .با توجه به اینکه در بررسی های انجام شده توسط محققان تا کنون موضوع تکنولوژی ساخت ، بررسی نشده است لذا نوآوری پروژه محسوب میشود.

کلید واژه :تکنولوزی ساخت بناهای رومی

سبک معماری کلاسیک:

۱- معرفی بناهای مشهور رومی:

۱-۱-پانتئون

پانتئون یکی از نمادین ترین و بهترین سازه های باستانی رم است. ستون‌های یکپارچه سنگی عظیم که رواق را در ورودی نگه می‌دارد، فضای داخلی باز و عظیم ایجاد شده توسط روتوندای (ساختمان گنبددار) استوانه‌ای شکل، و همچنین، گنبد بتنی منتهی به هورنو ،پانتئون را به یکی از شگفتی های مهندسی تبدیل مینماید.با اینحال پانتئونی که امروزه میبینید شبیه بنایی نیست که برای اولین بار ساخته شد .همچنین از نظر مکانی نیز تغییراتی یافته است. پانتئونی که امروزه وجود دارد (تصویر۱-۱)سومین بازسازی از کلیسای ادیان میباشد که در طول قرنها اصلاح و بازسازی شده است.این بنا تنها یک نمونه از بناهای تاریخی روم است که نمایانگر جاه طلبی منحصر بفرد ،تکنیک های

ساخت و ساز مبتکرانه و مهندسی قابل توجه رومی میباشد. به دلیل ثبت ناقص این تاریخ غنی، داستان پانتئون با سردرگمی و رمز و راز درهم آمیخته شده است .از انجایی که منابع مختلف درمورد همه ی نکات پانتئون اتفاق نظر ندارند،این پژوهش بر آن است تا با بررسی منابع اطلاعاتی متعدد به شگفتی های بیشتری در رابطه با تاریخچه ، تکنیک های ساخت و تکامل بنا در دوران مختلف دست یابد.(۱)

تصویر ۱-۱پانتئون امروز (Stephen T. Muench) – ساخت و رفتار پانتئون

۲-۱- برج پیزا

برج تاریخی پیزا که قدمتی در حدود هشتصد سال دارد تاریخچه کج شدن آن که قرنها پیش تا به امروز ادامه داشته.

در سال ۱۱۷۴ میلادی پس از ساخته شدن طبقه سوم زمین زیر پی آن نشست کرد که بناچار معمار برج یونانو) پیزا (نو) عملیات ساختمانی را متوقف نمود در سال ۱۲۸۰ حیوانی و اشیمون با وکالت از طرف اسقف اعظم ساختن برج را مجدداً شروع نمود ولی باز هم کج شد سیمون تصمیم گرفت انحنای برج را با افزودن به طول دیوارها و ستونهای طرفی که خمیده می شود جبران کند که این عمل اختلاف زاویه ای بوجود آورد که شکل خمیدگی آن معلول آنست . بعد از کشته شدن سیمون در جنگ بار دیگر عملیات ساختمانی برج متوقف شد جانشین او تو ماسو پیرانو اقدام به ساختن طبقه هشتم بر روی طبقه هفتم نمود که در نتیجه خمیدگی برج را بیشتر کرد(۲)

۳-۱-کلسیوم

کولوسئوم که به عنوان آمفی تئاتر فلاویان شناخته می شود، مسلماً شناخته شده ترین بنای تاریخی رم است. ساختار بیضی شکل که ۶ هکتار را در بر می گیرد، حضور و اهمیت مهندسی رومی را نشان می دهد و مفاهیم مهندسی متعددی را در ساختار آن گره می زند. پس از اولین بار دیدن کولوسئوم، بلافاصله به سمت طاق های بتنی مکرر که محیط را پوشانده بودند جذب شدم. با دانستن اینکه کولوسئوم به عنوان منبع اصلی سرگرمی برای مردم در قلب شهر عمل می‌کند، از مقیاس پروژه و اعمال مبتذلی که به عنوان سرگرمی و قدرت تلقی می‌شد، مجذوب من شدم. خود ساختمان زمانی دین و فرهنگ را برای جامعه رومی تعریف می کرد. ظاهر چشمگیر ساختمان نفس گیر بود و می دانستم که می خواهم بزرگ ترین آمفی تئاتر امپراتوری روم را بیشتر مطالعه کنم. پس از چندین بار مشاهده نمای بیرونی، انجام یک تور عمیق، سپس انجام ادبیات گسترده و تحقیقات آنلاین در مورد این موضوع، من توانستم مفاهیمی را در مورد تاریخ، ساخت و ساز، مهندسی، مرمت و استفاده امروزی یاد بگیرم و به کار ببرم. کولوسئوم رومی.(موندچ)

Engineering of the Flavian Ampitheatre (Roman Colosseum)

مهندسی آمفی‌تئاتر فلاویان (کولوسئوم رومی)

December ۵, ۲۰۱۷

https://fa.wikipedia.org/wiki/%DA%A9%D9%88%D9%84%D9%88%D8%B3%D8%A6%D9%88%D9%85

۲-مصالح مورد استفاده در بناها

۱-۲-پانتئون

--استفاده از بتن پوزولان شامل آهک و سنگریزه
-استفاده از خاکستر های آتش فشانی
-استفاده از دوغاب آهک مایع
-استفاده از آب

بتن مورد استفاده برای ساخت فونداسیون، بتن پوزولان است که از سنگدانه های تراورتن به صورت لایه ای تشکیل شده است که توسط ملات آهک و پوزولان در کنار هم نگه داشته می شود (مور، ۱۹۹۵). بتن رومی از سه جزء تشکیل شده بود: آهک هیدراته خمیری، پوزولان و قطعات سنگدانه. اغلب این مواد به وفور یافت می‌شد و از نزدیکترین محل به رم حمل می‌شد. آهک از سنگ آهک ساخته می‌شد که عمدتاً از کربنات کلسیم تشکیل می‌شد که در کوره گرم می‌شد تا تحت یک واکنش شیمیایی قرار گیرد و گاز موجود در سنگ آهک آزاد شود. محصول داخل کوره پس از روزها سوختن آهک زنده نرمی بود که با مخلوط شدن با آب حالت خمیری پیدا می کند و با خشک شدن سفت می شود. دومین عنصر بتن، پوزولان، یک خاکستر آتشفشانی است که از یک ترکیب سیلیس آمورف تشکیل شده است. هنگامی که با دوغاب آهک مایع مخلوط می شود، سوراخ های بزرگ در ساختار مولکولی پوزولان پر می شود و منبسط می شود تا سایر قطعات به هم قفل شوند. آخرین ماده، سنگدانه اضافه می شود یا بتن برای جرم و استحکام بیشتر، مستقیماً روی لایه ای از سنگدانه قرار می گیرد. فرآیندهای مربوط به ایجاد و استفاده از بتن نیاز به شیمی زیادی دارد. هنگام ایجاد یک فرم قابل استفاده از آهک، هنگام مخلوط کردن مقادیر مختلف مواد، و سپس اجازه دادن به بتن برای زمان مناسب خشک شود، در ضخامت مناسب برای تشکیل و سخت شدن ساختار. رومی ها از سیستم نسبت ها برای تعیین نحوه اختلاط بهترین بتن با استفاده از مواد خاص استفاده می کردند (مور، ۱۹۹۵). با توجه به اینکه رومی‌ها از شیمی مولکولی چیزی نمی‌دانستند، ، بتن آنها از طریق آزمون و خطا ساخته شده است، با این حال آنها می‌توانستند بتن قابل مقایسه با بتن مدرن، یعنی از نظر انواع مواد مورد استفاده در ساخت آن، به دست آورند. ، اما لزوما با مقاومت بسیار برتر بتن مدرن قابل مقایسه نیست.

برای ساخت فونداسیون ابتدا ترانشه های مدور حفر کردند و آنها را با تخته های چوبی پوشاندند تا قالب بتن را ایجاد کنند. سپس بتن را روی لایه‌هایی از قطعات سنگ فشرده کردند و اجازه دادند خشک شود (پارکر، ۲۰۰۹). تراکم بتن گام بسیار مهمی بود، بطوری که ویترویوس در نوشته هایش ذکر کرده که "وقتی مهر زنی تمام شد باید ... سه چهارم ارتفاع اولیه آن باشد" (مور، ۱۹۹۵). تراکم برای استحکام و دوام

بتن مهم بود زیرا یک واکنش شیمیایی باید انجام شود و فشردگی بتن با حذف هر گونه شکاف هوا و آب اضافی، مولکول ها را به هم نزدیک می کند. هنگامی که در مجاورت نزدیک تر و بدون آب اضافی در راه هستند، اتم های پوزولان و آهک می توانند با به اشتراک گذاشتن الکترون ها بهتر به یکدیگر متصل شوند و این باعث ایجاد یک بتن بادوام می شود (مور، ۱۹۹۵)

۲-۲- برج پیزا

-استفاده از سنگ های مرمر منطقه
-استفاده از آهک
-استفاده از پوزولان
-استفاده از خاکستر های آتش فشانی
-استفاده از دوغاب آهک مایع
-استفاده از آب

این منطقه شامل چهار ساختمان مربوط به قرون وسطی با نمایی از سنگهای سفید و درخشان مرمر است که شامل برج ناقوس، کلیسای مرکزی، تعمیدگاه و بنای گورستان است. مانند دیگر ساختمانها در پیازا (Piazza) برج ناقوس همانند یک سمبل شهری ساخته شده بود تا در عین زیبایی، منحصر به فرد بودن و مرموز بودن، حالت ثروتمند بودن این قسمت از شهر را منعکس می کند

کلسیوم

۳- ابزارمورد استفاده در ساخت بناها

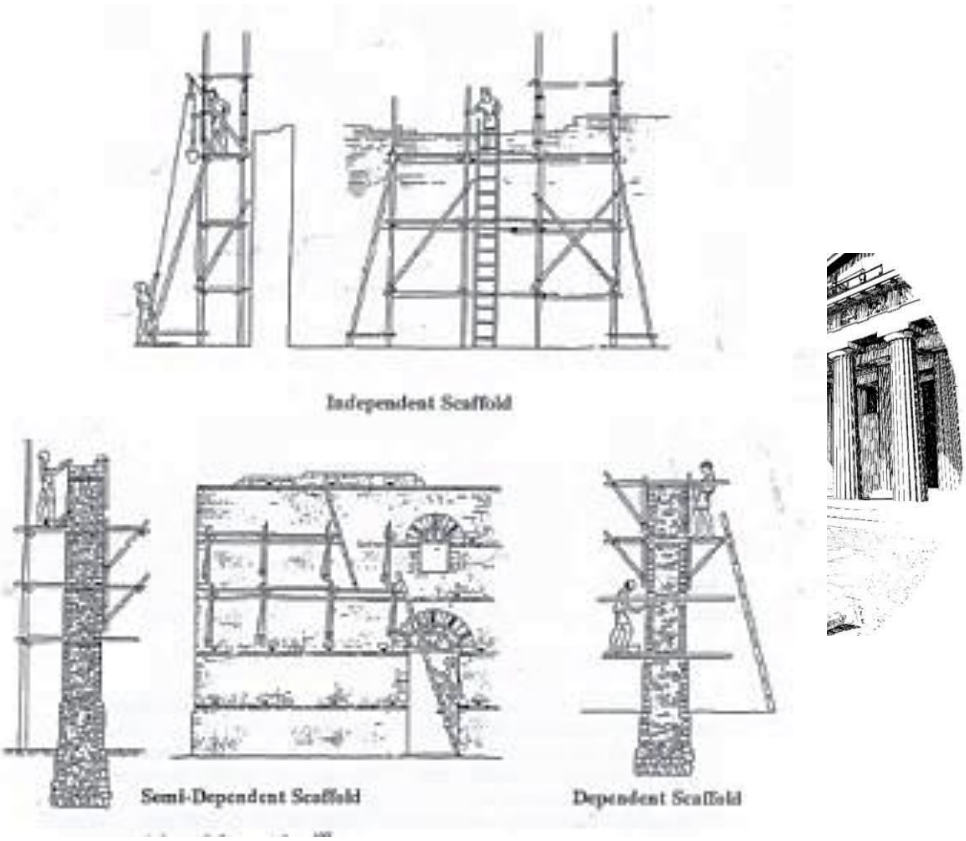
۱-۳-پیزا

-استفاده از قالب چوبی نیم دایره
- استفاده از میله
-استفاده از طناب
-استفاده از قرقره
-استفاده از چرثقیل
-استفاده از داربست چوبی

دیوارهای آجری با لایه بندی اجر و ملات در لایه بعدی سنگدانه و سپس در لایه ی رویی ملات آهک و پوزولان قرار میگرفت سپس بتن متراکم و خشک میشد سپس قوسهای مازه دار با نصب یک قالب چوبی نیم‌دایره‌ای موقت بر روی دهانه، قرار دادن یک لایه نازک ملات روی

آن برای ایجاد بستری برای آجرها ساخته می‌شدند و سپس آجرها را در انتها روی قالب قرار می‌دادند. آجرهای طاق‌ها دوفوت، از نوع آجر رومی مربع بود که طول و عرض آن حدود ۶۰ سانتی‌متر و ضخامت آن حدود ۲ سانتی‌متر بود. قوس های مازه دار در پایین بنای گنبدی یک لایه دوفوت ضخامت دارند، اما در قسمت های بالایی دو یا سه لایه ضخامت دارند. پس از حذف فرم، فضای خالی زیر با آجر و بتن پر می شود. همچنین لایه‌هایی از آجر به ضخامت ۲ آجر به‌صورت افقی، در تمام طول دیوار تقریباً در هر ۱٫۱ متر بالای دیوار قرار می‌گرفتند، که تصور می‌شود راهی برای سازندگان بوده تا دیوار را در همان زمان که ساخته می‌شوند، مسطح و صاف نگه دارند. (مور ۱۹۹۵

سازندگان برای ساخت دیوارها از داربست چوبی استفاده کردند که بسیار سبک بودند و با طناب به هم گره می‌خوردند. داربست ها سه نوع بوده است: داربست مستقل که به تنهایی می ایستاده و نیازی به حمایت از سازه دیگری نداشته، داربست وابسته که در سوراخ هایی که به طور استراتژیک در سازه قرار داده شده است وارد می شده و به طور کامل توسط سازه ای که آنها استفاده می کردند حمایت می شده است. داربست برای ساخت و داربست نیمه وابسته که ترکیبی از هر دو بوده است. این داربست هاتوسط زمین و سازه در حال ساخت پشتیبانی می شده است. سازندگان پانتئون احتمالاً هنگام ساخت دیوار و گنبد از ترکیبی از این نوع داربست ها استفاده کردند. (تصویر ۱-۱۰) (مور ۱۹۹۵).



تریسپاتوس (نوعی جرثقیل باستانی)

ساده ترین نوع جرثقیل رومیان تریسپاتوس بوده که متشکل از یک میله ، یک وینچ ، یک طناب و یک سازه که شامل ۳ قرقره میباشد.

پنتاپاستوس : نوعی جرثقیل سنگین تر که میتوانست ۵ قرقره را در خود جای دهد ، در نمونه های بزرگتر ، که پولی اسپاستوس نام دارند ، میتوانستند ۳ طناب و ۵ قرقره ها را در خود جای دهند و بسته به نوع بار ، دارای ۲ ، ۳ ، یا ۴ تیرک باشند.

برج پیزا

۴- تکنیک اجرا

پانتئون:

- استفاده از جرثقیل
- استفاده از برج های بالابر
- استفاده از چوب های چند لایه
- استفاده از طناب های نگهدارنده
- استفاده از قرقره ها
- استفاده از تسمه
- استفاده از چرخ

ستون‌های پانتئون از سبک ستون‌های رومی معمولی بودند، اما بزرگ‌تر از بسیاری از ستون‌هایی بودند که در این دوره از زمان استفاده می‌شدند، بنابراین ایجاد، انتقال و برپایی آن‌ها بسیار شاهکار بود.

Fig. 5: Haterii Relief (CIL VI.19151), depiction of treadmill crane at work in the construction of an unknown temple.

تصویر ۱-۱۴روش بالا بردن ستون(Sahotsky, n.d.)

رومی هابرای بالا بردن ستون‌ها از تجهیزات مختلفی از جمله جرثقیل، برج‌های بالابر و سایر ماشین‌های ساده استفاده می‌کردند. در کتاب دهم ویتروویوس در مورد ماشین‌ها، نویسنده جرثقیل‌های زیادی را توصیف می‌کند و توضیح می‌دهد که این ماشین‌ها برای بالا بردن بارهای سنگین در حین «تکمیل معابد و کارهای عمومی» و همچنین برای بارگیری و تخلیه کشتی‌ها استفاده می‌شوند. وی خاطرنشان می کند که برخی از این ماشین ها به صورت عمودی در حالت ثابت قرار می گیرند، در حالی که برخی دارای بوم های گردان هستند. ویتروویوس همچنین ابزاری از چوب چند لایه و طناب های نگهدارنده را توصیف می کند که شبیه مکانیزم اهرم تکیه گاه است. کاپستان‌ها در سطح زمین، طناب‌ها را از طریق قرقره‌ها تغذیه می‌کنند تا به طور موثری تیرهای چوب را منقبض کنند و ستون را از حالت افقی خوابیده به حالت

ایستاده عمودی خود بکشند. جرثقیل های چوبی بزرگ، سپس ستون را در جای خود در هر سکو بالا می بردند. بسته به اندازه بارها، این جرثقیل ها از بازوهای یک یا دو بوم استفاده می کردند. بزرگترین بارها به دنده کاهش نیاز دارد، از جمله استفاده از کاپستان برای کشش بازوهای بوم. سخت ترین و غیر قابل تحمل ترین بارها را جرثقیل های تردمیل جابجا می کنند، این جرثقیل ها با حداکثر هشت کارگر در داخل پره های چرخ تمسه بکار گرفته میشوند که قدرت لازم را. برای کنترل بارها فراهم می کنند. (ساهوتسکی، n.d.)

برج پیزا

-استفاده از روش حفاری خاک
-پی کنی
-اجرای بتن ریزی
- سیستم کابل ها در بالای زمین
- نصب لوله های انحصاری در زمین
استفاده از قطعات سربی

از میان طرحهای برگزیده شده، فقط طرح Novelli در برگیرنده تمام معیارها بود. در سال ۱۹۹۰، Novelli Vittoroطرح خود را به کمیسیون پیشنهاد کرد که شامل حفاری خاک، پی بتنی و سیستم کابلها در بالای زمین بود، که در این طرح مقدار کاهش کج شدگی پیش بینی شده حدود ۰/۵ درجه بود که برای کاهش فشار و تثبیت می توانست کافی باشد.

روش مذکور شامل حفاری از زیر و فشار توسط قطعات سرب از بالا می شد، هیچکدام از این راه حلها ثابت شده و قانع کننده نبود و کارایی آنها بسیار شک برانگیز بود. در این روش که شامل استخراج و حفاری خاک به تدریج به وسیله نصب یکسری لوله های انحصاری فقط در زیر قسمت شمالی پی بود که می توانست موافقت کمیسیون را جلب کند. چون این روش قبلا با موفقیت برای کاهش صدمات ناشی از نشست در کلیسای جامع در مکزیکوسیتی انجام شده بود، اما این روش در مورد برج، آن هم در منطقه ای بسیار متفاوت کمی شک برانگیز بود

کلسیوم

- ترکیب دو سالن و نیم دایره
- ایجاد یک بیضی پیوسته
- تقسیم بندی بر اساس طبقه اجتماعی
-رعایت اصل تقارن
- عرض و ارتفاع سالن برابر

- استفاده از ۸۰ قوس مساوی برای پوشش
- استفاده از تکنولوژی های مهندسی رومیان جمله طاق و ستون
-استفاده از سیستم سایبان
-استفاده از سیستم فاضلاب

کولوسئوم در بالای دره ای قرار داشت که دریاچه نرون در آن قرار داشت و یکی از مسائل اصلی زهکشی بود .برای ساخت پایه آمفی تئاتر، ابتدا زهکش های عظیمی برای تخلیه دریاچه ساخته شد .سپس دره را کاوش کردند تا اینکه به بستر رسی در زیر شن و ماسه و سیلت رسید که اندازه آن ۳۱ متر عرض و ۶ متر عمق داشت .سپس حفاری با بتن رومی فشرده شده توسط چکش اشغال شد .پر کردن تا ۶ متر دیگر بالای حفاری ادامه یافت، زیرا سازه بالاتر از سطح زمین ساخته شده بود .پی با آجر در اطراف آن تقویت شد .هنگامی که پایه گذاری شد، ساخت آمفی تئاتر آماده آغاز شد.(Pepe, n.d.)

ساختار کامل، با ابعاد ۶۲۰×۵۱۳ و ظرفیت بیش از ۵۰۰۰۰ تماشاگر(History.com ۲۰۱۰)، به صورت آمفی تئاتر شکل گرفته است، شکلی که توسط رومی ها با ترکیب دو سالن نمایش نیم دایره برای ایجاد یک بیضی پیوسته ایجاد شده است (پ پ ان دی) هدف این ساختمان ارائه انواع سرگرمی برای خدمت به جامعه رومی بود. صندلی‌ها بر اساس طبقه اجتماعی چیده شده بودند - امپراطور بهترین صندلی‌ها را در خانه داشت، در حالی که سناتورها بهترین صندلی‌های بعدی را برای آنها در نظر گرفته بودند. معمار که ناشناخته است می خواست با نسبت ۵:۳ یا ۳۰۰×۱۸۰ فوت رومی بسازد. تقارن نشان داد که عرض سالن، عرض سالن و ارتفاع نمای خارجی همگی برابر هستند. محیط، ۱۸۸۵ فوت رومی، برای طراحی مهم بود، زیرا ۸۰ قوس مساوی برای پوشش کامل آن نیاز داشت (هاپسکین . ان دی.) .مفاهیم رومی تناسبات و تقارن در جای دیگری در سراسر ساختمان یافت می شود. مفاهیم مهندسی رومی مانند طاق ها، ستون ها و طاق ها نیز در طراحی بسیار رایج هستند.

فونداسیون می‌تواند باعث نشست و برخی از آسیب‌های سازه در طول زمان شود و موارد بسیاری از کار مرمت را ضروری می‌کند .ساخت سیستم متروی زیرزمینی رم در نزدیکی کولوسئوم باعث کاهش استحکام فونداسیون نیز شده است و همچنین خسارت وارده را به همراه داشته است.

ساختمان‌های روم باستان از طاق‌هایی استفاده می‌کردند، زیرا آنها اجازه می‌دادند تا بلوک‌های سنگی بزرگ به گونه‌ای قرار داده شوند که ساختار را پشتیبانی کند و وزن را تحمل کند .این مسلما مهمترین ویژگی معماری عرصه است که کل نما را احاطه کرده است .هدف مهندسی قوس این است که فشار را به سمت پایین و خارج هدایت کند و باعث ایجاد تنش فشاری در قوس شود .زمانی که کولوسئوم ساخته شد، بتن رومی یک کشف اخیر بود که می‌توانست وزن سازه‌های مقیاس بزرگ را تحمل کند، اما رومی‌ها از طول عمر آن مطمئن نبودند . سازندگان بتن رومی را با سنگ ترکیب کردند تا طاق ها را برای افزایش استحکام آن بسازند(Alchin, n.d.)

برای سیستم آب و فاضلاب موجود در زیر سازه از لوله های سربی و سفالی استفاده شد

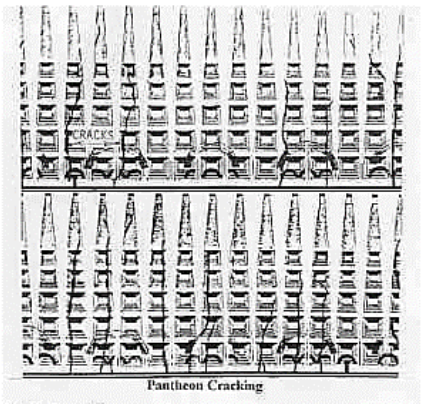
۵- مکانیزم انتقال بار

۱-۵-پانتئون:

- استفاده از حلقه های پلکانی در گنبد
- استفاده از شیارهای مستطیلی که از گنبد خارج شده‌اند

حلقه های پلکانی بیشتر تکیه گاه رانش جانبی گنبد را فراهم می کردند. با افزودن جرم کافی در پایه، جایی که نیرو متمرکز است، حلقه ها مانند تکیه گاه عمل می کنند. این حلقه های تکیه گاه دلیل این است که گنبد از بیرون مانند یک نیم دایره کامل به نظر نمی رسد، بلکه بیشتر به شکل کاسه ای است. دلیل اینکه آنها وزن بتن گنبد را در سطوح مختلف تغییر دادند این بود که گنبد را با مواد ارزان‌تر سبک‌تر کنند و در عین حال حمایت ساختاری کافی را فراهم کنند. با ایجاد وزن کمتر گنبد در نزدیکی بالا، اما با سنگین‌تر کردن پایین گنبد، در قسمت پایینی که به آن نیاز بود، حمایت بیشتری برای نیروی رانش جانبی ناشی از بار بقیه گنبد در بالا فراهم کرد (لانکستر، ۲۰۰۶). تلاش های دیگر برای سبک سازی گنبد در خزانه داخلی گنبد و نازک شدن گنبد از ۷ متر در پایه تا ۲ متر در بالا دیده می شود. ۱۴۰ خزانه شیارهای مستطیلی هستند که از گنبد خارج شده اند تا اندکی در وزن و مواد صرفه جویی کنند، اما یک منظره هنری نیز به آن اضافه کنند.

علی‌رغم تلاش‌های فراوان برای جلوگیری از تنش بیش از حد در گنبد با کاهش وزن، گنبد پانتئون در بسیاری از نقاط ترک خورده است. با توجه به اینکه بتن به شکل گنبدی است، به وسیله تنش حلقه ای در معرض کشش قرار می گیرد و از آنجایی که بتن در کشش ضعیف تر از فشار عمل می کند، تنش حلقه باعث ایجاد ترک در گنبد و دیوارها شده است. از ترک خوردگی پانتئون نقشه برداری شده است و یک مطالعه طراحی توسط مارک و هاچینسون شکستگی‌هایی را شناسایی کرد که از پایه روتوندا تا قله گنبد می‌رسیدند که فکر می‌کردند در اثر نشست‌های متفاوت ناشی از بارگذاری ناهموار دیوار، به‌ویژه نزدیکی ورودی روتوندا در طاقچه اصلی. به‌جای یافتن نشست دیفرانسیل عمودی باشد، آثاری از دهانه‌های جانبی در سراسر شکاف‌ها مشاهده میشوند که مربوط به اثر کشش حلقه است. (مور، ۱۹۹۵)



نقشه برداری از شکاف های گنبد پانتئون. (مور، ۱۹۹۵)

۲-۵-پیزا

۳-۵-کلسیوم

استفاده از پایه های بتنی دونات شکل

بلند کردن سطح زمین

استفاده از قوسهای لولایی

استفاده از طاق رومی

ضخیم کردن دیواره ها با تکیه گاه ها

این سازه باید عاقلانه برنامه ریزی می شد، زیرا قرار بود مکان آن در جایی ساخته شود که دریاچه دست ساز نرون در آن نگهداری می شد .زهکش های ۲۶ فوتی آب را از دره های اطراف خارج می کردند در حالی که پایه های بتنی دونات شکل زیر دیواره های بیرونی و بیضی داخلی قرار داده شده بود .سطح زمین به اندازه ۲۳ فوت از دره بلند شد تا آمفی تئاتر روی آن بنشیند .میزان کارشناسی که برای برنامه ریزی پروژه صرف شده است یکی از عوامل اصلی این است که چرا هنوز هم پابرجاست .(هاپکینز)

به گفته توماس ای. به طور کلی از یک قوس دو لولایی در نظر گرفته می شود و رانش افقی به عنوان کمیت اضافی انتخاب می شود

طاق های بیرونی از بتن رومی ساخته شده بود که بدون اضافه کردن وزن زیادی به ساختمان استحکام می بخشید .طاق ها توسط رومی ها با ترکیب قوس های متعدد برای پشتیبانی ساختاری اختراع شد .سقف معابر و راهروها در نمای بیرونی همگی دارای طاق های طاقدار با تکیه گاه های ساخته شده از سنگ آهک مقاوم بودند .طاق‌ها سقف را بسیار محکم‌تر از سقف صاف می‌کردند و وزن را از طاق‌ها از طریق ستون‌ها به پایین منتقل می‌کردند .(Alchin, n.d.) برای جلوگیری از فرو ریختن، مقاومت در برابر رانش افقی باید وجود داشته باشد . رومی‌ها این را با ضخیم‌کردن دیواره‌ها با تکیه‌گاه‌هایی که در نواحی با رانش افقی شدید قرار داده بودند، پیکربندی کردند (دایره‌المعارف الکترونیکی کلمبیا، ۲۰۱۲) .طاق های بشکه ای در طبقه اول کولوسئوم وجود داشت که کل محیط بیرونی را پوشانده بودnd

منابع :

۱- ساخت و رفتار پانتئون دکتر Stephen T. Muench (توسط دانش آموز الک هریسون) / ۱۲,۱۴,۲۰۱۵ دانشیار مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه واشنگتن)

۲- غفاری ، اسدالله روش تحکیم و تثبیت برج پیزای ایتالیا

دکتر Stephen T. Muench (توسط دانش آموز الک هریسون) / ۱۲,۱۴,۲۰۱۵ دانشیار مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه واشنگتن