University of Tehran Prees

Journal of Archaeological Studies

Online ISSN: 2676-4288

https://jarcs.ut.ac.ir/

Archaeological Survey of the Water Supply System and Water Cycle at the ʿĀli Qāpu Palace of Isfahan

Elahe Rouhollahi [1], **Ali Shojaee-Esfahani** ✉ [2], **Saeed Ghaseminezhad** [3]

1. Ph.D.Candidate in Department of Archeology, Faculty of Conservation and Restoration, Isfahan University of Arts, Isfahan, Iran. Email: e.rouhollahi@aui.ac.ir

2.Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Archeology, Faculty of Conservation and Restoration, Isfahan University of Arts, Isfahan, Iran.. Email: a.shojaei@aui.ac.ir

3.Independent Researcher, Isfahan, Iran. Email: saeed.ghaseminezhad@gmail.com

Article Info

Article Type:
Research Article

Article History:

Received:
6 June 2023

In Revised Form:
11 September 2023

Accepted:
2 November 2023

Published online:
18 April 2024

Abstract

The Āli Qāpu Palace, one of the grand constructions erected during the Safavid period (907-1135 AH) in Isfahan, stands out as one of the most renowned architectural marvels of its time. Despite garnering attention from experts in restoration, architecture, and art history, the palace has remained largely overlooked in archaeological standing bulding studies. A significant aspect contributing to this oversight has been the neglect of investigating its water supply system since its inception, leading to various unfounded assumptions. In this article, the authors aim to address this gap by conducting a comprehensive examination of the components and functioning of the water supply system of the Āli Qāpu Palace, drawing upon written, oral, and documentary sources pertaining to the remnants of its water supply structure. Through meticulous documentation of remaining evidence and scrutiny of primary sources, in conjunction with data obtained from restoration efforts, this study reveals a sophisticated understanding of the mechanics employed by the creators in establishing an efficient and integrated water supply system for the palace, particularly for transferring water to its upper floors. This system of water supply and circulation draws upon precedents set by machines developed in centuries preceding the Safavid era, which facilitated the transfer of water within the palace premises. Consequently, this research not only sheds light on the water supply facilities of the Āli Qāpu Palace and the intricate cycle of water transfer within its different sections but also lays the groundwork for understanding similar structures. By unraveling the mechanisms behind the palace's water supply, this study contributes to a deeper appreciation of the technological and engineering prowess of Safavid-era architects and engineers while offering valuable insights for future research into analogous architectural endeavors.

Keywords: Isfahan, Safavid period, ʿĀli Qāpu palace, Water supply system, Mechanical science.

Cite this: The Author(s): Rouhollahi, E., Shojaee-Esfahani, A., Ghaseminezhad, S., (2024). Archaeological Survey of the Water Supply System and Water Cycle at the ʿĀli Qāpu Palace of Isfahan. *Journal of Archaeological Studies* / No. 1, Vol.16, Serial No. 34 / Winter – Spring (207-230). DOI: 10.22059/jarcs.2023.360435.143214

CC BY

Publisher: Unversity of Tehran Prees

1. Introduction

Water holds a pivotal role in Iranian architecture, particularly evident in Safavid architectural practices. Its presence often influences the design and layout of buildings, with gardens and palaces frequently featuring prominently as testament to water's significance in architectural endeavors during this period. Notably, the addition of a dedicated section to the ʿĀli Qāpu Palace for water supply to the basin within the hall exemplifies the high regard for water in Safavid architecture. This section of the water supply system facilitated the pumping of water to the upper floors of the palace, enabling the circulation of the hall's basin fountains, which captivated viewers with wonder and admiration.

Through field studies and examination of available evidence within the palace, particularly through documentation and mapping of the water supply section, efforts were made to elucidate the workings of this system by cross-referencing existing photographs and maps with textual sources. Drawing upon written accounts and surviving documents from conservation teams, this research endeavors to address the fundamental question of how the water supply system and circulation within the palace functioned, offering insights that may extend to identifying similar systems in other buildings, especially those from the Safavid era.

Findings from these studies reveal that the system relied on the mechanical expertise of its builders, evident in various aspects such as the dimensions and materials of the four basins, as well as the architectural design of the building. Contrary to existing hypotheses, such as the source of feeding water for the fountains and the use of blacksmith's bellows for water pumping, this research offers new insights. Additionally, meticulous examination and identification of remaining components, with precise measurements, shed light on the structure's configuration.

The water tower structure, distinct from the main building and specialized for water supply, emerges as a focal point. Its construction and layout are tailored specifically for supplying water to the courtyard pool and operating the fountains, showcasing an intelligent design that ensures efficient functionality. The identification of each section and component of the complex water supply system underscores the meticulous planning and execution of the project.

Travelers' references to the term "machine" and the specialized engineering evident in the water tower suggest minimal human intervention in the operation of the water supply and circulation system. Notably, features such as a canal for a piston system and cavities on the tower's walls further indicate the mechanized nature of the system. The proposed theory posits the existence of three machines for water supply operations and fountain circulation, distributed across different levels of the tower.

However, challenges arise in accurately reconstructing the connections of the water supply system and the components of these machines due to extensive damage to various parts of the palace over time. Efforts to simulate the water pump system offer hope for uncovering the precise functioning and location of the system within the structure.

مجله مطالعات باستان شناسی
شاپای الکترونیکی:۴۲۸۸-۲۶۷۶
https://jarcs.ut.ac.ir

معرفی ساختار آب‌رسانی و چرخهٔ آب در کاخ عالی‌قاپوی اصفهان [(۱)]

الهه روح‌الهی[۱]، علی شجاعی اصفهانی[۲]✉، سعید قاسمی‌نژاد[۳]

۱. دانشجوی دکتری در گروه باستان‌شناسی دانشکده حفاظت و مرمت دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: e.rouhollahi@aui.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه باستان‌شناسی دانشکده حفاظت و مرمت دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: a.shojaei@aui.ac.ir
۳. پژوهشگر مستقل، اصفهان، ایران. رایانامه: saeed.ghaseminezhad@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
علمی – پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۳/۱۶

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۲/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۸/۱۱

تاریخ انتشار:
۱۴۰۳ /۰۱/۳۰

چکیده

عمارت عالی‌قاپوی اصفهان از جمله بناهای فاخر ساخته‌شده در دورهٔ صفوی (۹۰۷- ۱۱۳۵ هق.) اگر نه به عنوان شاخص‌ترین بنا که از مشهورترین آن‌ها به شمار می‌آید. عمارت کاخ از نمادهای معماری این دوران هرچند مورد توجه متخصصین حوزه‌های مختلف مرمت، معماری و تاریخ هنر واقع‌شده، اما بررسی‌ها و پژوهش‌های باستان‌شناختی پیرامون این بنای شاخص مغفول باقی مانده است. در این میان سیستم آب‌رسانی کاخ و انتقال آب به طبقات بالا از زمان ساخت تاکنون در شمار جنبه‌های قابل توجهی بوده که عدم مطالعهٔ آن بستر را برای طرح فرضیات غیر واقعی مهیا ساخته است. نویسندگان مقاله با استفاده از منابع مکتوب، وارسی و مستندنگاری بقایای ساختار آب‌رسانی کاخ عالی‌قاپو، تلاش دارند تا بخش‌ها، اجزا و چگونگی عملکرد آن را مورد بررسی قرار دهند. ثبت و ضبط شواهد باقی‌مانده و مطالعه منابع دست اول در کنار داده‌های به دست آمده از مرمت‌های صورت گرفته نشان داد، شناخت بالای سازندگان از علم مکانیک زمینهٔ ایجاد نظامی کارآمد و هماهنگ در آب‌رسانی کاخ و انتقال آب به طبقات فوقانی را میسر نموده بود. نظامی برگرفته از ماشین‌های ساخته‌شده در قرون پیش از روی کار آمدن حکومت صفوی که با الگو قرار دادن آن موجبات انتقال آب در کاخ مهیا شده بود. بدین ترتیب مطالعهٔ صورت گرفته نه تنها منجر به شناسایی تأسیسات آب‌رسانی کاخ عالی‌قاپو و فهم چگونگی چرخه و انتقال آب در بخش‌های مختلف ساختمان شد که زمینه را برای شناخت موضوع در ساختمان‌های مشابه نیز فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: اصفهان، دورهٔ صفوی، کاخ عالی‌قاپو، سیستم/ نظام آب‌رسانی، علم مکانیک.

استناد: روح‌الهی، الهه؛ شجاعی اصفهانی، علی، قاسمی‌نژاد، سعید: (۱۴۰۳-۱۴۰۲)؛ «معرفی ساختار آب‌رسانی و چرخهٔ آب در کاخ عالی‌قاپوی اصفهان»: مجله مطالعات باستان‌شناسی، دورهٔ ۱۶، شمارهٔ ۱، زمستان و بهار - پیاپی ۳۴ -(۲۳۰-۲۰۷).
DOI: 10.22059/jarcs.2023.360435.143214

CC BY

ناشر: مؤسسهٔ انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

وجود آب در معماری ایرانی به‌ویژه در معماری دورهٔ صفوی عنصری ضروری و تفکیک‌ناپذیر است. بخشی مهم که گاهی معماری بنا را تحت تأثیر قرار داده و ساختار بنا حول‌وحوش آن شکل می‌گیرد. اهمیت آب و در نظر گرفتن آن در بنا در این دوره سبب طراحی باغ‌ها و کاخ‌هایی شده که بررسی آن‌ها نشان از جایگاه بالای آب در خلق بنا و پیدایش آن‌ها دارد. الحاق بخشی به کاخ عالی‌قاپو جهت آب‌رسانی به حوض واقع در تالار، از برجسته‌ترین این موارد است و اهمیت و جایگاه آب در معماری صفویه را اثبات می‌نماید. بخشی مختص به سیستم آب‌رسانی که قادر بود آب را به طبقات بالایی کاخ پمپ و موجب گردش فواره‌های حوض تالار گردد و مایهٔ شگفتی و تحسین ناظران را فراهم آورد. سامانه‌ای بی‌نقص که نه تنها در زمان خود با اتکا بر نمونه‌های پیشین یک نوآوری به شمار می‌رفت که امروزه نیز پیچیدگی و عدم درک چگونگی کارکرد آن سبب بیان مفروضاتی پیرامون نحوهٔ عملکرد آن گردیده است. طی مطالعات میدانی و بررسی شواهد موجود در کاخ، به‌ویژه با انجام مستندنگاری و نقشه‌برداری بخش آب‌رسانی(۲) علاوه بر ثبت و برداشت اندازه‌های دقیق، تلاش شد تا با جانمایی و تطبیق عکس‌ها و نقشه‌های موجود با مستندات کنونی به شرح چگونگی عملکرد این سیستم پرداخته شود. با بررسی منابع مکتوب و اسناد برجای مانده از تحقیقات گروه‌های مرمت، تحقیق پیش‌رو تلاش برای یافتن پاسخی به این پرسش بنیادی دارد که عملکرد سیستم آب‌رسانی و چرخهٔ آب در کاخ چگونه و با چه روشی صورت می‌گرفته است؟ پرسشی که پاسخ به آن علاوه بر فهم بهتر بنا می‌تواند چونان نقشهٔ راهی برای شناخت نظام‌های آب‌رسانی به کار رفته در سایر ابنیهٔ ساخته شده به‌ویژه در دورهٔ صفوی باشد. مطالعات و بررسی‌ها نشان داد سامانهٔ مورد بحث بر پایهٔ شناخت و دانش سازندگان آن از علم مکانیک استوار بود و مصادیق و شواهد آن را می‌توان در معماری بنا، ابعاد و اندازهٔ حوض‌ها و جنس لوله‌های به کار رفته در این سیستم مشاهده کرد؛ ساز و کاری هوشمندانه که به نظر می‌رسد با تبعیت از نمونه‌های ادوار پیش از خود شکل گرفته است.

۲. پیشینهٔ پژوهش

در میان منابع و مکتوبات موجود، تنها در بین آثار برخی از سفرنامه‌نویسان دورهٔ صفوی، نشانه‌هایی از چگونگی کارکرد چرخهٔ آب‌رسانی کاخ به چشم می‌خورد که در فهم صحیح موضوع راهگشا است. از جملهٔ این افراد ژان‌باتیست تاورنیه[1] (حضور در ایران مابین سال‌های ۱۰۴۸ تا ۱۰۷۵ هق. در زمان حکومت شاه‌عباس دوم و شاه سلیمان) طریقهٔ رساندن آب به حوض تالار را به واسطهٔ وجود یک ماشین بیان و به همین مطلب مختصر بسنده می‌کند (تاورنیه، ۱۳۸۹: ۸۸؛426 :Tavernier, 1676). پس از او شاردن[2] (حضور در ایران مابین سال‌های ۱۰۶۴ تا ۱۰۷۸ هق. در زمان حکومت شاه‌عباس دوم و فرزندش شاه سلیمان) در نتیجهٔ رفت و آمدهای بسیار به دربار صفوی و کاخ‌های آنان توضیحات مفصل‌تری در مورد نحوهٔ کارکرد سیستم آب‌رسانی کاخ ارائه می‌دهد. او حوضی از جنس(۳)سنگ سیلیس[3] را با سه فواره در میان تالار کاخ توصیف می‌کند که آب مورد نیاز آن به وسیلهٔ چند گاو و سه ماشین که یکی بالای دیگری است تأمین می‌شود (شاردن، ۱۳۷۴: ۱۴۵۶؛ Chardin, vol 7, 1811: 387).

1. Jean Baptiste Tavernier
2. Jean Chardin
3. Jaspe

توصیفات تاورنیه و شاردن پیرامون چرخهٔ آب‌رسانی کاخ، اگرچه مختصر، حاوی مطالب ارزشمندی دربارهٔ این مکانیزم آب‌رسانی پیچیده است. اشاره به وجود ماشین و یا ماشین‌هایی که سبب انتقال آب به طبقات فوقانی کاخ می‌گردید و با در نظر گرفتن معنی این واژه در زبان فرانسه که به تعبیهٔ مجموعهٔ قطعات و ابزارهایی جهت ایجاد نیرو اطلاق می‌شود، منجر به بررسی بخش‌های برجای مانده از سیستم آب‌رسانی در سایر طبقات کاخ شد[۴] (URL1). موضوع قابل بررسی دیگر در توصیفات شاردن و دیگر سفرنامه‌نویسان این دوره عدم اشاره به قسمت مسی حوض واقع در تالار است و سبب بروز این پرسش می‌گردد که آیا کل حوض تالار از جنس سنگ مرمر (Jaspe) بوده است؟ در این خصوص باید یادآور شد سفرنامه نویسان مذکور همیشه حوض لبریز از آب و پاشویه‌های مرمری آن را مشاهده کرده‌اند و در نتیجه دید واضحی از قسمت تحتانی حوض نداشته‌اند. وجود کتیبه‌ای پیرامون تعداد و وزن قطعات مس در کف حوض و وزن کمتر مس نسبت به سنگ، وجود حوض مسی را از همان زمان ساخت تأیید می‌کند (Galdieri, 1978: 149-150).

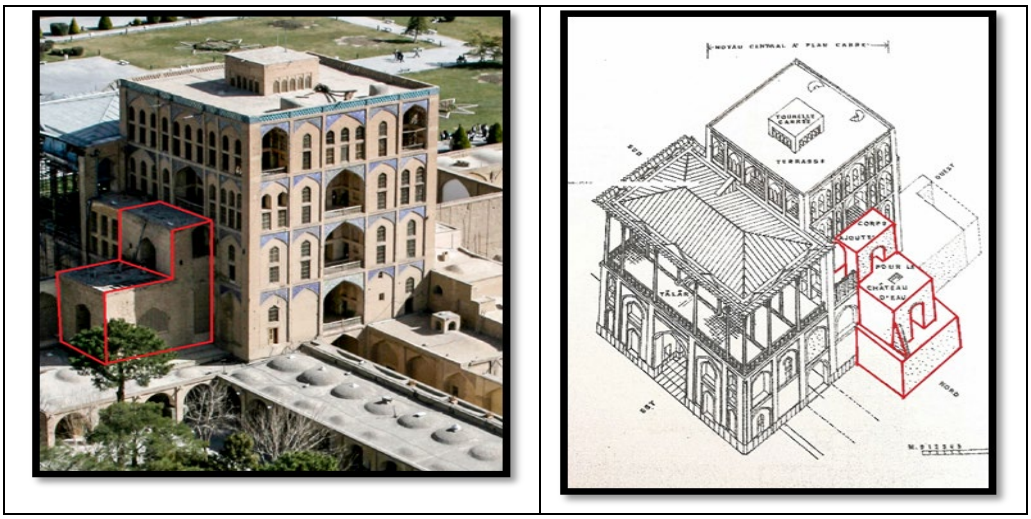
علاوه بر توضیحات تاورنیه و شاردن، سانسون[۱] (حضور در ایران در سال ۱۰۹۵ هـ ق. در زمان حکومت شاه سلیمان) اشاره به بالا آوردن آب توسط تلمبه‌ها دارد (سانسون، ۱۳۴۶: ۷۶; Sanson,1695: 58) و کمپفر[۲] (حضور در ایران در فاصله سال‌های ۱۰۹۴ تا ۱۰۹۶ هـ ق. در زمان حکومت شاه سلیمان) علاوه بر توصیف حوض تالار به یکی از طبقات سازهٔ آب‌رسانی (بخش الحاقی ضلع شمالی کاخ) و بخشی از سیستم هیدرولیک واقع در آن اشاره می‌کند که به منظور آب‌رسانی حوض و فواره‌های کاخ به کار می‌رفته است (کمپفر، ۱۳۶۳: ۲۰۳؛ kampfero, 1712: 181). در نهایت کاری[۳] (حضور در ایران در سال ۱۱۰۶ هـ ق. اواخر حکومت شاه سلیمان و روی کار آمدن شاه سلطان حسین) به وجود وسیله‌ای مخصوص که آب را جهت حرکت فواره‌ها به کاخ می‌رساند اشاره دارد (کاری، ۱۳۸۳: ۹۵; Careri, 1708: 75). استفاده از واژه‌های ماشین، پمپ، هیدرولیک و توصیفاتی مبنی بر دستگاهی پیچیده جهت انتقال آب در نوشته‌های فوق منجر به بررسی شواهد بازمانده در بخش‌های مختلف کاخ و فهم عملکرد چرخهٔ آب شد. علاوه بر مکتوبات و مستندات تاریخی، آنچه به آشکار شدن این فرایند پیچیده کمک می‌کند، شواهد شناسایی‌شده گروه مرمتی ایزمئو[۴] در دههٔ پنجاه هجری شمسی است که توسط گالدیری[۵] سرپرست گروه در قالب بخشی از کتاب *عالی‌قاپو*[۶] مطرح شده است (Galdieri, 1978: 65-67). اسناد مذکور اگرچه داده‌های قابل توجهی را در این رابطه آشکار کرده‌اند؛ اما کمبود شواهد مادی سبب ایجاد شبهاتی از جمله منبع آب تغذیه کنندهٔ سیستم آب‌رسانی و نحوهٔ انتقال آن به طبقات فوقانی کاخ شد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۳. معرفی بخش الحاقی کاخ عالی‌قاپو (برج آب) و زمان ساخت آن

ساخت ایوان کاخ به نقل از شاملو، مورخ عصر شاه‌عباس دوم (حک: ۱۰۷۷-۱۰۵۲ هق.) در روز پنج‌شنبه بیست و چهارم ذی‌القعده ۱۰۵۳ هـ. ق. شروع و در زمان کوتاهی به «سرکاری مخدوم الامراء الاکرام میرزا تقی وزیر اعظم» به اتمام رسید (شاملو، ۱۳۷۱: ۲۸۰). تجربه‌ای از ساخت‌وسازهای وزیر اعظم (میرزا تقی ساروتقی) در

1.Nicolas Sanson.
2. Engelbert Kaempfer
3.Giovanni Francesco Gemelli Careri
4.Ismeo
5.Eugenio Galdieri
6.*Esfahan: ALI QAPU an architectural survey*.

مازندران که در جهت کاخ‌سازی‌های وسیع این دوره به کار گرفته شد (کتبی، ۱۳۸۵: ۴۸). می‌توان گفت، اضافه کردن بخش مهمی به بنایی که هم از لحاظ سیاسی دارای جایگاه ویژه‌ای بود و همچنین از بعد مذهبی مقام و رتبهٔ والایی داشت، مقدمه‌ای بود برای اضافه کردن ساخت‌وسازهایی که سایهٔ شاه‌عباس کبیر (حک: از ۱۰۳۸-۹۹۶) بر آن‌ها سنگینی نکند. قصرها و ساختمان‌های سلطنتی که عنصر آب و نوآوری در به نمـایش آوردن آن‌ها بیش از پیش به ویژگی شاخصشان بدل گشت. در بین سایر کاخ‌های این دوره نظام آب‌رسانی عمارت عالی‌قاپو با بهره‌گیری از یک پمپاژ مبتکرانه «حکایت از لاینفک بودن عنصر آب» در معماری این دوره داشت (بابائی، ۱۳۹۸: ۲۹۷). به‌کارگیری خلاقانهٔ آب در طراحی و ساخت دیگر کاخ‌های صفوی از جمله باغ بلبل نیز قابل ردیابی است. تلمبه‌خانهٔ این باغ قادر بود آب را از چاه به وسیلهٔ یک محور اسب‌گرد به یک مخزن پمپ و از آن‌جا توسط لوله‌هایی به تمام حوض‌ها و فواره‌های حرمسرا و بناهای مجاورش انتقال دهد (kampfero: 178). سازهٔ الحاقی ضلع شمالی کاخ عالی‌قاپو یا تلمبه‌خانهٔ کاخ که گالدیری از آن تحت عنوان برج آب یاد می‌کند ساختمانی ۳ طبقه به منظور قرارگیری بخش‌های مختلف چرخهٔ آب‌رسانی است (Galdieri: 65) (تصویر ۱). هرچند شواهدی مبنی بر زمان ساخت برج آب در منابع تاریخی وجود ندارد؛ اما بررسی نحوهٔ اتصال برج آب به کاخ، به‌خوبی نشان از ساخت متأخر برج دارد. وضعیت کنونی و ضرورت چرخش آب در حوض و فواره‌ها نیز گویای آن است که برج آب و ایوان کاخ همزمان با هم ساخته شده‌اند. برج آب در ۳ طبقه با ارتفاع ۱۹/۶۲ متر شامل بخش‌هایی چون ۳ حوض در ابعاد مختلف، لوله‌هایی از جنس مس، سرب و سفال، آبراهه‌ها، مخازن و صفحات سنگی است که بخش‌هایی از آن در حال حاضر وجود ندارد (نقشه ۳-۱).



تصویر ۱: نمای برج آب (زاندر، ۱۳۹۶: ۱۷۳)(بخش رنگی تصویر سمت راست)، تصویر هوایی از برج آب (ناشناس) (تصویر چپ)
Figure 1: A view of the water tower, the colored part of the image on the right (zander, 2017,173); Aerial image of water tower on the Left (Anonymous)

۴. فرضیات مطرح‌شده پیرامون سیستم آب‌رسانی کاخ عالی‌قاپو

تخریب بخش‌هایی از اجزاء سیستم آب‌رسانی و عدم مشاهدهٔ منبع تأمین‌کنندهٔ آب مورد نیاز این سازه، همچنین توضیح مختصر اسناد تاریخی در این خصوص سبب ایجاد دو فرضیهٔ نادرست پیرامون چنین ساختار پیچیده‌ای شده است. نخستین فرضیه منبع تغذیهٔ آب کاخ عالی‌قاپو را مربوط به یکی از چشمه‌های واقع در کوه صفه (چشمه نُقَط) می‌داند (جابری انصاری، ۱۳۷۸: ۱۴۹؛ همایی، ۱۳۸۴: ۱۱۵). به نظر می‌رسد تخریب‌های

گستردهٔ دورهٔ مسعود میرزا ظل‌السلطان (حک: ۱۲۹۷-۱۲۶۲) و آشکار شدن تنبوشه‌ها و کانال‌های آب در نتیجهٔ این ویرانی‌های وسیع، عاملی مهم در مطرح شدن آن باشد. امری که همواره در پی عملیات عمرانی شهری در سال‌های اخیر نیز تکرار شده است (URL2) (تصویر ۲). در رد این نظر لازم است به کم آبی در برخی از سال‌های اصفهان و عدم بارش در ماه‌های گرم سال اشاره کرد که منجر به جریان اندک آب در زاینده‌رود و به تبع آن مادی‌ها و چاه‌های شهر و همچنین تغییر در دبی چشمه‌های کوه صفه از جمله چشمهٔ نقط می‌شد (تحویلدار، ۱۳۸۸: ۴۵). طبیعتاً این منبع آب حتی در دوران پر آبی نیز نمی‌توانست منبعی قابل اتکا برای به کار انداختن فواره‌های کاخ در بزم‌ها و برنامه‌های متنوع به‌خصوص در فصل بهار و تابستان باشد.

تصویر ۲: تنبوشه‌های یافت شده در جریان احداث ساخت بخش‌هایی از ساختمان استانداری (آرشیو شخصی مرحوم مرتضی پور موسی دهه هفتاد شمسی)
Figure 2: pipes found during the construction of parts of the governorate building (personal archive of Morteza Pourmosiin the 70s)

با فرض وجود آب کافی و دائمی، به دلیل فشار بالا به مجرای لوله‌های آب که باید در طول بیش از ۷۵۰۰ متر فاصله مابین کوه تا عمارت عالی‌قاپو (به خط مستقیم) کشیده می‌شدند، چنین پروژه‌ای منطقی به نظر نمی‌رسید. اگر برای هر کدام از تنبوشه‌های سفالی با توجه به نمونه‌های مشابه کمتر از ۵۰ سانتی‌متر طول در نظر گرفته شود، میزان اتصالات مابین لوله‌ها در این مسیر طولانی به حدی افزایش می‌یافت که فشار بالای جریان آب منجر به شکست اتصالات لوله‌ها می‌گردید. بر فرض تعبیهٔ حوضچه‌های فشارشکن برای جلوگیری از چنین پیشامدی، عبور لوله‌ها از بستر رودخانه و در نتیجهٔ آن افت ارتفاع، دبی آب را طبق ضابطهٔ هیزن ویلیامز[1] دچار افت شدید و عملیات آب‌رسانی را دچار مشکل می‌کرد. افت فشار، ناشی از عواملی همچون زبری، جنس لوله، خمیدگی، بستر لوله‌گذاری، میزان اتصالات و قطر داخلی لوله‌ها می‌شود و تنها با فن‌آوری امروزی شیرهای تخلیه هوا می‌توان مشکل آن را برطرف کرد (کاظمی سوچلمایی و تابش، ۱۳۹۷: ۲۳-۳۴). (۵)

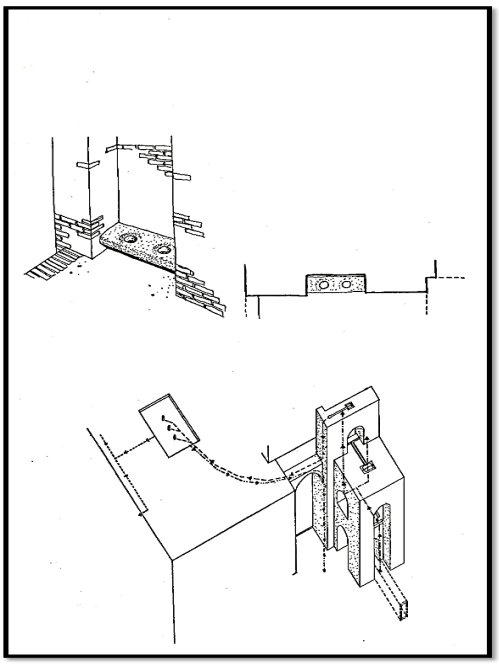
1. Hazen- Williams equation.

در فرضیهٔ دوم که در گفته‌های شفاهی مطرح می‌شود وجود گاوچاهی در شمال کاخ برای تأمین آب مورد نیاز آن عنوان شده است. این فرض نیز با توجه به مطالعات گروه ایزمئو (Galdieri, 1978: 66) و پس از آن در طی مرمت‌های توحید خانه و فضای پیرامونی آن در سال‌های ۱۳۵۶، ۱۳۵۹ و ۱۳۶۱ هـ ش. قابل تأیید نیست. در این مرمت‌ها که با نظارت باستان‌شناسان محمد مقدسی و مریم باباشاهی صورت گرفت شواهدی که وجود گاو چاه را در این محل نشان دهد یافت نشد (کریمی، ۱۳۸۲: ۴۰-۱۲).

اما آنچه بسیاری از محققان بر سر آن اتفاق نظر دارند و شواهد به دست آمده از بررسی‌های گروه ایزمئو نیز آن را تأیید می‌کند، وجود نهر سرپوشیدهٔ آب در طبقهٔ همکف برج است که با حفر دهانه‌ای روی آن امکان برداشت آب فراهم شده بود (Galdieri: 65) [۶]. نهر مذکور را می‌توان انشعابی از مادی جوی شاه دانست که در دولت‌خانه و امتداد کاخ جریان داشته است (حسینی ابری، ۱۳۷۹: ۱۲۶-۱۲۷). اگرچه تأیید نهایی این موضوع نیاز به بررسی بیشتر دارد؛ اما شناسایی یک نهر سرپوشیدهٔ آب در دههٔ هفتاد هـ ش. (ابوئی، ۱۳۷۷: ۳۳۲) در مسیر راه شاهی کاخ، ظن عبور نهر مورد بحث از این مسیر را تقویت می‌کند.

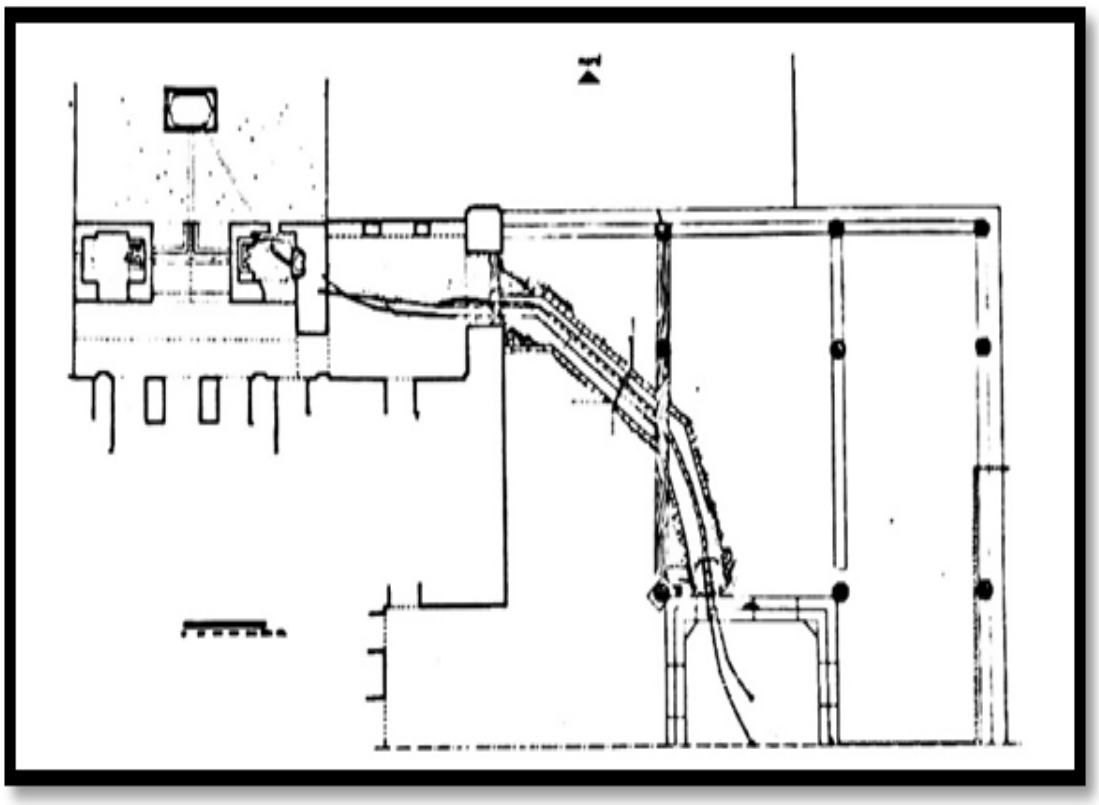
۵. بررسی چرخهٔ آب‌رسانی در کاخ عالی‌قاپو

گزارش گروه ایزمئو، بدون بیان جزئیات، دو طرح از برخی اجزاء سیستم آب‌رسانی کاخ را در خود دارد، اما به دلیل تمرکز گروه بر امر حفاظت و مرمت، طرح‌های موجود فاقد اطلاعات لازم برای رسیدن به پاسخ پیرامون نحوهٔ عملکرد این سیستم است (تصویر ۴-۳). برای شناخت بهتر این فرایند، تک‌تک اجزاء برجای مانده مورد بررسی و شناسایی قرار گرفت و با روش دستی توسط متر لیزری با خطای کمتر از ۲ سانتی‌متر برداشت شد (نقشهٔ ۱).



تصویر ۳: کروکی چگونگی چرخهٔ آب در کاخ عالی‌قاپو که در تصویر بالا مخازن سنگی طبقهٔ اول (حرف R1,R2 در نقشهٔ ۱ و ۲) و تصویر پایین مسیر آب برای به کار انداختن فواره‌ها را نشان می‌دهد (Galdieri,1979: 101)

Figure 3:Sketch of how the water cycle in the Ali Qapu palace. In the picture above, there are stone reservoir on the first floor (R1,R2 in Map 1,2) and in the picture below, the water path to operate the fountains is shown (Galdieri,1979: 101)



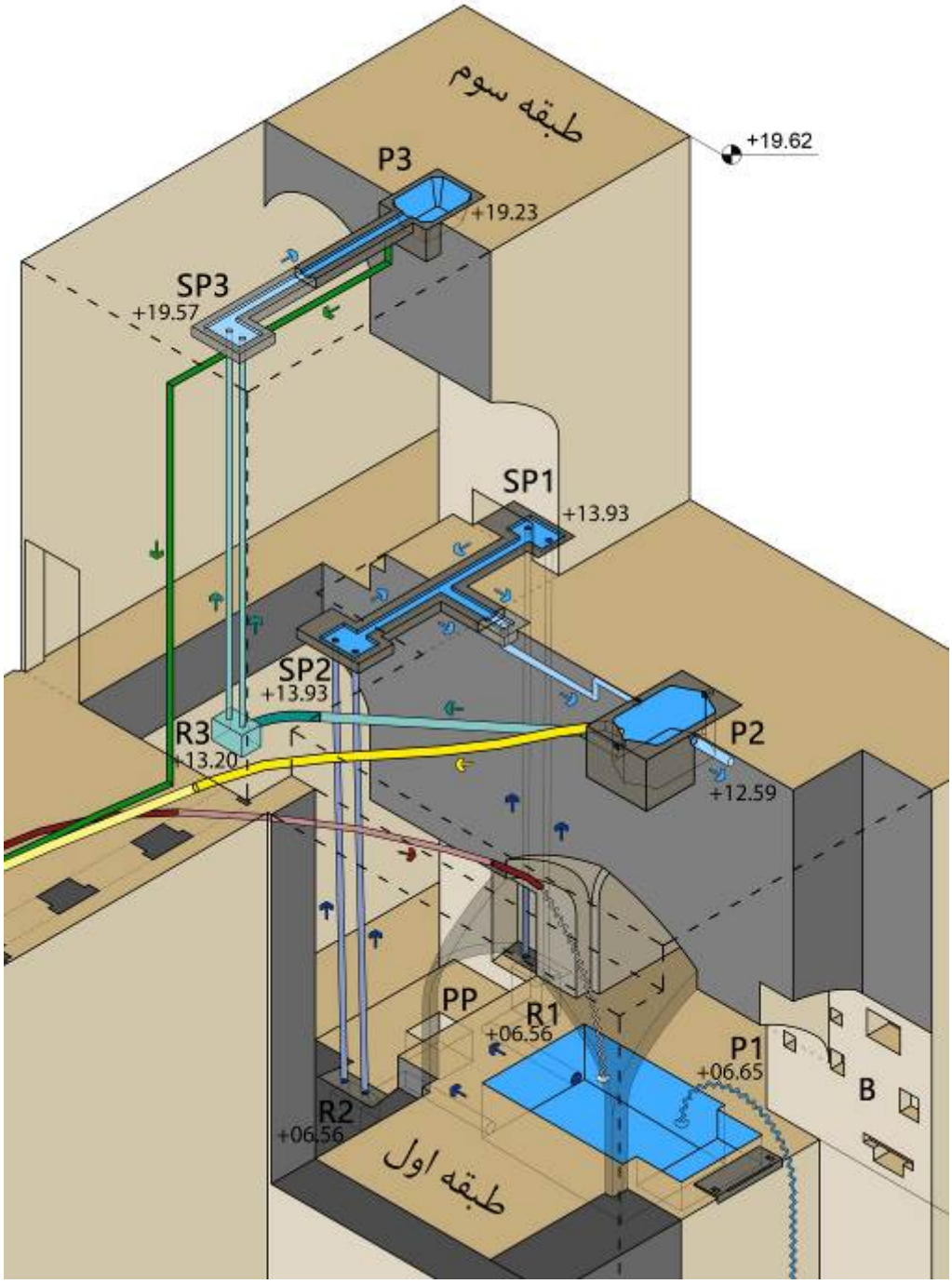
تصویر ۴: محل عبور لوله‌های منتهی به حوض تالار (حرفD در نقشه۱ و۲) (زاندر، ۱۳۹۶: ۳۳۳)
Figure 4: The passage of the pipes leading to the hall pond (D in map No: 1,2) (Zander, 2017:333)

به این منظور طبقات برج آب که تنها طبقهٔ همکف آن تغییر وضعیت پیدا کرده است و در اختیار دانشگاه هنر اصفهان قرار دارد، مستندنگاری و عملکرد برج آب مورد محاسبه و تحلیل قرار گرفت تا پیشنهادی برای چرخهٔ آب در برج آب کاخ عالی‌قاپو و حرکت فواره‌ها ارائه شود. این شواهد در طبقهٔ همکف: محل آبراههٔ زیرزمینی، چاه و محل حرکت حیوان و در طبقهٔ اول: مخازن سنگی، حوض، آثار برجای مانده از چرخ آب و محل احتمالی قرارگیری پمپ آب را در بر می‌گیرد. طبقهٔ دوم: دو اتاقک با صفحات سنگی جهت خروج آب، حوض و ۲ خروجی آن جهت تأمین آب حوض تالار و در نهایت طبقهٔ سوم که شامل حوض، آبراههٔ سنگی و لوله‌هایی جهت تغذیهٔ آب فواره‌ها می‌شود.

گالدیری علاوه بر معرفی بخش‌هایی از سیستم آب‌رسانی کاخ به توضیح در مورد عملکرد آن نیز می‌پردازد. به گفتهٔ او آب پس از کشیده شدن از چاه حفرشده روی آبراهه، توسط فشار زیاد به حوض طبقهٔ اول (P 1) (نقشهٔ ۱ و ۲) و از آنجا توسط لولهٔ مسی تعبیه شده به حوض تالار ریخته می‌شد که در نتیجهٔ اختلاف سطح، فواره‌ها شروع به کار می‌کردند (Galdieri: 65-66). او بر خلاف هنرفر که سیستم چرخ و نیروی گاو را در بالا کشیدن آب از چاه حفرشده روی آبراهه مطرح می‌کند (هنرفر، ۱۳۵۰: ۴۲۲) این نظریه را با ادله‌ای همچون کم بودن فضا و عدم حضور حیوانات در محوطهٔ کاخ و عدم وجود بقایای چرخ‌ها رد می‌کند (Galdieri: 66).

نقشه ۱: نمایی از برج آب و اجزاء آن (نگارندگان)

Map 1: Water tower and its components (Authors)



نقشه ۲: نمایی از طبقات برج آب و اجزا آن (بخش تقطیع شده از نقشهٔ ۱ جهت خوانش آسان برای مخاطب) (نگارندگان)

Map 2: A view of the floors of the water tower and its components (Cropped of Map 1 for easy reading) (Authors)

در مورد فضای لازم جهت حرکت گاو، به دلیل دوار بودن مسیر حرکت، احتیاج به فضای چندانی نبوده است و شواهد موجود و گفته‌های سیاحان آن را تأیید می‌کند (Tavernier: 426,Chardin, vol 7: 387) (نقشه ۱). نهایتاً در مورد عدم بقایای چرخ‌ها، لازم است به فضای B (نقشهٔ ۱ و ۲) اشاره کرد که به‌خوبی محل قرارگیری

چرخ‌ها را در طبقهٔ اول نشان می‌دهد و هم اکنون آثار آن به شکل دوازده حفره در این قسمت از کاخ وجود دارد (تصویر ۵؛ نقشهٔ ۱ و۲).

تصویر ۵: محل اتصالات چرخ بر دیواره‌های برج آب در طبقهٔ اول (نگارندگان، بهار ۱۳۹۹)

Figure 5: The location of wheel connections on the walls of the water tower on the first floor (Authors 2020)

گالدیری در ادامه به گرم شدن آب، قبل از ریختن به حوض تالار اشاره می‌کند و محل این گرمخانه‌ها را دو صفحهٔ سنگیSP1 و SP2 (نقشه ۱ و۲) می‌داند و حوض‌های سنگی واقع در طبقات دوم و سوم برج آب (P2 و P3) (نقشهٔ ۱ و۲) را محل جمع‌آوری آب کانال‌های گرم کننده و منبع پخش و جمع‌آوری اضافات آب گرم جریان یافته در لوله‌ها قلمداد می‌کند (Galdieri, 1979 65-70). از جمله دلایل گالدیری برای اثبات این فرضیه، آثار دوده و سوختگی بر دیواره‌ها است که اگر به گفته‌های هنرفر که توسط رفیعی مهرآبادی نیز تکرار شده رجوع شود دلیل آن مشخص می‌گردد (رفیعی مهرآبادی، ۱۳۵۲: ۳۸۰).

«روزهای بیست و یکم ماه رمضان در این قصر باز بود و مردم دسته‌دسته برای پختن نذر خود بعمارت عالی‌قاپو روی می‌آوردند و در هر یک از ایوان‌ها و اطاق‌های این کاخ تا طبقه سوم در آن روز مخصوص آتشی افروخته بود و بر آن آتش، نذر یکی از حاجتمندان آماده می‌شد در حالی‌که دود سراسر این اطاق‌ها را فرا گرفته و تزیینات نقاشی را سیاه رنگ می‌کرد» (هنرفر: ۴۲۰). گالدیری بدون توجه به منبع تغذیهٔ آب فواره‌ها، حوض‌های P2 و P3 را برای جمع‌آوری و توزیع آب گرم معرفی می‌کند (Galdieri, 1979: 66). در رد این فرضیه باید به حجم آب حوض تالار (P4) (۲۱۷۵۵ لیتر) و حجم بالای سوخت جهت گرم شدن آن اشاره کرد که فضای محدود به گفتهٔ گالدیری «گرمخانه» آن را امکان‌پذیر نمی‌ساخت. در نهایت باید به اسکلت چوبی و تزیینات بنا اشاره کرد که غیر عملی بودن چنین فرضیه‌ای را اثبات خواهد کرد. گالدیری استفاده از مس در ساخت حوض تالار را برای حفظ گرمای آب دانسته است، اما عواملی از جمله وزن سازه، پیوستگی و جوشش کارآمدتر محل اتصالات لوله‌های مسی با بدنهٔ حوض را باید دلیلی برای چرایی جنس حوض تالار مطرح کرد. گالدیری در نهایت سیستم دم آهنگری را برای تفسیر کلمهٔ ماشین از نوشته‌های شاردن به کار می‌برد و اذعان می‌دارد یک دم آهنگری با دو دهانه یا دو لوله با نیروی دو نفر قادر بوده است آب را به طبقات بالا بکشد (Galdieri: 67).

چرخهٔ آب در کاخ عالی‌قاپو حاصل عملکرد ۳ حوض، مخازن، سینی‌ها و لوله‌هایی از جنس مس، سرب و سفال است که در یک هماهنگی کامل عمل انتقال آب و به کار افتادن فواره‌های حوض تالار را بر عهده دارند

هرچند بخش‌هایی از این سیستم از میان رفته است اما با بررسی شواهد موجود و بخشی که در مطالعات گروه ایزمئو آشکار شد می‌توان به چگونگی جریان یافتن آب در مسیرهای تعبیه‌شده، جهت جریان آب در لوله‌ها، ورودی‌ها و خروجی‌های آب حوض‌ها و در نهایت انجام و سرانجام آن دست یافت (نقشهٔ ۱ و۲).

۶. معرفی اجزاء سیستم آب‌رسانی و نحوهٔ حرکت آب در کاخ عالی‌قاپو

با کاوش‌های دههٔ پنجاه شمسی توسط گروه تحقیقاتی ایزمئو در زیر برج آب، آبراههٔ زیرزمینی تغذیه کنندهٔ نظام آب‌رسانی کاخ شناسایی شد (قسمت A از نقشه ۱ و ۲) (Galdieri, 1979 65-66). طبق شواهد برجای مانده بر دیوارهٔ ضلع شمالی برج آب، واقع در طبقهٔ اول (تصویر۵) آب از طریق چرخ و با نیروی گاو به حوض طبقهٔ اول یا به عبارتی حوض مادر[۷] (P1) ریخته و با همان نیروی محرکه آب به سایر بخش‌های برج آب هدایت می‌شد (تصویر۶).

تصویر۶: حوض مادر (P1) و مسیرهای خروجی آن به بخش‌های R1 و R2 (تصویر راست)، دریچهٔ تخلیه حوض (تصویر چپ) واقع در طبقهٔ اول (نگارندگان، بهار ۱۳۹۹)

Figure 6: Mother pond (P1) and its output routes to sectors R1,R2 (Right image), Basin drain valve (Left image) on the first floor (Authors 2020)

تصویر ۷: مخازن R1 و R2 در ضلع شرقی و غربی طبقهٔ اول برج آب. فضای مخزن در تصویر سمت راست قابل مشاهده است (نگارندگان، بهار ۱۳۹۹)

Figure 7: Reservoirs R1,R2 on the east and west sides of the first floor of the water tower. The reservoirs space can be seen in the image on the right (Authors 2020)

حوض مادر دارای یک دریچهٔ تخلیه و دو مسیر جهت هدایت آب از جنس سفال به مخازن R1 و R2 در ضلع جنوبی حوض است (تصویر۶). آب پس از ورود به این دو مخزن (تصویر۷) از طریق لوله‌های سربی جاگذاری شده در مخازن، به طبقهٔ دوم هدایت و پس از آن از طریق صفحات سنگی (SP1 و SP2) واقع در طبقهٔ دوم (تصویر۸) وارد آبراههٔ سنگی منتهی به حوض این طبقه (P2) می‌شد و آن را پر می‌کرد (تصویر ۱۰-۹).

تصویر۸: صفحات سنگی SP1 و SP2 واقع در طبقهٔ دوم برج آب (نگارندگان، پاییز ۱۴۰۲)

Figure 8: Stone plates SP1,SP2 on the second floor of the water tower (Authors 2023)

حوض سنگی طبقهٔ دوم دارای یک ورودی آب از لبهٔ ضلع جنوبی، دو دریچه یکی جهت هدایت آب به حوض تالار (لولهٔ زرد رنگ نقشهٔ ۱ و۲) و دیگری جهت پر کردن حوض طبقهٔ سوم ساخته شده است (لولهٔ سبز رنگ نقشه ۱ و۲). همچنین دریچه‌ای جهت تخلیهٔ آب در ضلع غربی حوض و حفره‌ای با قطری حدود ۲ سانتی‌متر بر دیوارهٔ ضلع شمالی حوض، احتمالاً جهت سرریز حوض طراحی شده است (تصویر ۱۰-۹).

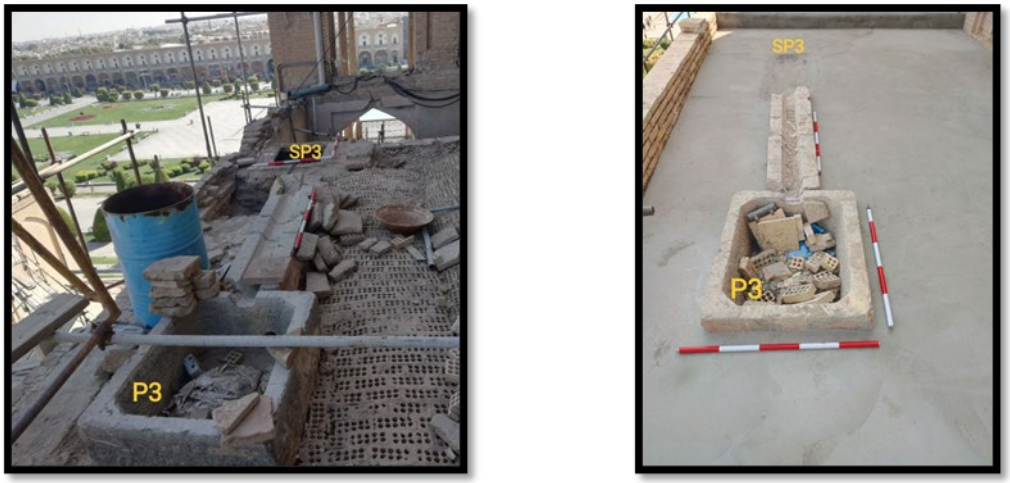
تصویر ۹: آبراههٔ سنگی و مسیر ورودی و خروجی آب به حوض P2 در طبقهٔ دوم (نگارندگان، پاییز ۱۴۰۲)
Figure 9: Stone channel and water inlet and outlet of P2 pool on the second floor (Authors, 2023)

پس از پر شدن حوض R2، دریچهٔ بالایی انتقال آب به حوض P4 برداشته و به واسطهٔ لولهٔ سفالی (لولهٔ زرد نقشهٔ ۱ و۲) حوض تالار پر می‌شد. پس از پر شدن نیمی از حوض تالار، دریچهٔ ورودی آب تالار بسته و این بار دریچهٔ پایینی مربوط به حوض طبقهٔ سوم (P3) باز می‌شد. اگرچه شواهدی از طریقهٔ انتقال آب به حوض طبقهٔ سوم باقی نمانده است، اما می‌توان پیشنهاد داد همانند طبقهٔ اول، آب به مخزنی سنگی وارد می‌شد و با کمک لوله‌ای سربی و صفحه‌ای سنگی، حوض طبقهٔ سوم پر می‌شد. در تأیید این نظر می‌توان به بقایای لولهٔ

سفالی در طبقهٔ دوم اشاره کرد، این لوله به فضایی منتهی می‌شد که مخزن سنگی فرضی در آن قابل تصور است (نقشه ۱ و ۲). همچنین در طبقهٔ سوم امکان نصب صفحهٔ سنگی مشابه با طبقهٔ دوم وجود دارد که شواهد آبراه منتهی به حوض این طبقه می‌تواند دلیلی بر تأیید این پیشنهاد باشد (تصویر ۱۱). بدین ترتیب آب پس از ورود به مخزن R3، همانند طبقهٔ اول توسط دو لولهٔ موازی در کنار هم به صفحهٔ سنگی SP3 واقع در طبقهٔ سوم هدایت و آب از طریق آبراههٔ سنگی منتهی به حوض P3 وارد آن می‌شد (تصویر۱۱). در آخرین مرحله پس از پر شدن حوض مذکور، دریچهٔ خروجی حوض برداشته و آب از طریق لولهٔ متصل به آن‌که در حال حاضر وجود دارد (لولهٔ سبز رنگ نقشه ۱ و۲) وارد فواره‌ها می‌شد و به سبب اختلاف سطح موجود، فواره‌ها شروع به کار می‌کردند.

تصویر ۱۰: حوض طبقهٔ دوم (P2) و دریچه خروج اضطراری حوض P2 (تصویر بالا راست)، محل دریچهٔ ورودی آب (تصویر بالا چپ)، دریچه تخلیه حوض (تصویر پایین راست) و دریچه‌های هدایت آب به حوض طبقهٔ سوم وحوض تالار (P3 وP4) (تصویر پایین چپ) (نگارندگان، بهار ۱۳۹۹، پاییز ۱۴۰۲)

Figure 10: Second floor pool (P2) and P2 Pool emergency exit valve (Top right image), water inlet valve (Top left image), pool drain valve (Bottom right image) and valves directing water to the third floor and Hall (P3, P4)(Authors 2020, 2023)



تصویر ۱۱: صفحهٔ سنگی SP3 و حوض P3 (نگارندگان، بهار ۱۳۹۹، ۱۴۰۲)

Figure 11: Stone plate on the third floor SP3 and pool P3 (Authors 2020, 2023)

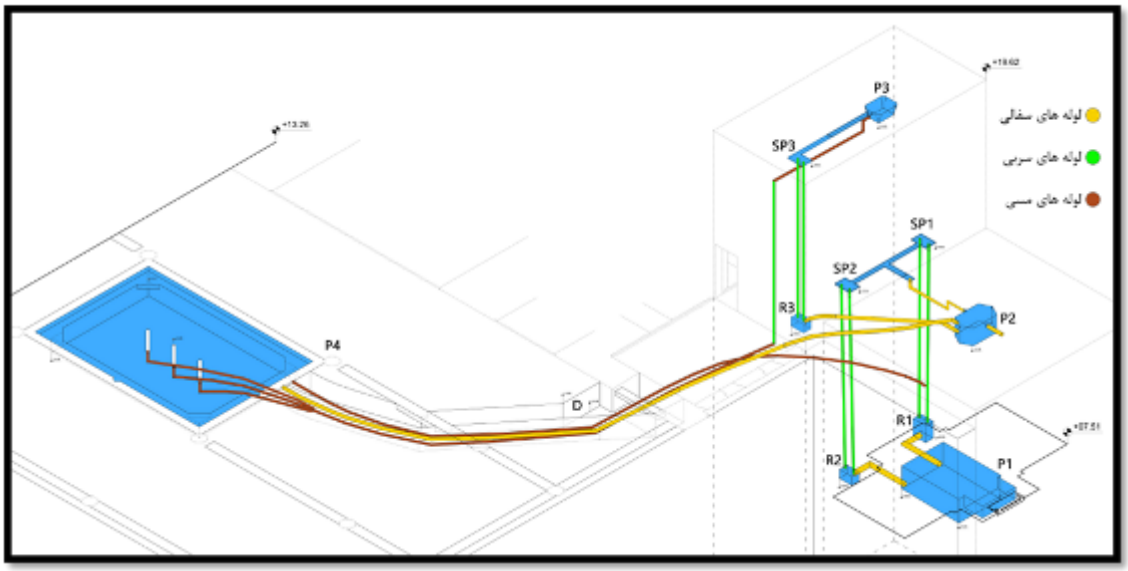
پس از به حد نصاب رسیدن آب حوض تالار، آب از طریق دریچهٔ خروجی که در ضلع شمال غربی حوض قرار داشت به واسطهٔ لولهٔ مسی منتهی به آن طبق محاسبات انجام شده به حفره‌ای واقع در طاق طبقهٔ اول، بالای حوض مادر منتهی می‌شد (لولهٔ قرمز رنگ نقشهٔ ۱ و ۲). با ریختن سرریز حوض تالار به حوض مادر امکان چرخهٔ بستهٔ حرکت آب در مسیرهای موجود فراهم می‌آمد و با یک بار پر شدن حوض تالار آب به فراخور نیاز با حجم ثابتی به کار خود ادامه می‌داد (نقشهٔ ۱ و ۲؛ تصویر ۱۲). حوض تالار دارای پاشویه‌ها و ناودان‌هایی است که امکان خروج آب در شرایط اضطراری را فراهم می‌آورد. مدیریتی هوشمندانه در استفاده از آب و بهره‌وری از آن‌که علاوه بر جلوه و زیبایی به کاخ با کمترین انرژی قادر بود عملیات پمپاژ و چرخهٔ آب را انجام دهد.

تصویر ۱۲: حفرهٔ داخل طاق حوض‌خانهٔ طبقهٔ اول کاخ دید به سمت شرق (نگارندگان، بهار ۱۳۹۹)

Figure 12:The hole inside the arch of the first floor of the water tower (view to the east) (Authors, 2020)

برای عملیاتی نمودن چنین پروژه‌ای علاوه بر واقف بودن به مهندسی سازه و اجرای یک سازهٔ معماری بدون نقص، وجود آگاهی و دانش در جهت به‌کارگیری مواد و مصالح گوناگون در به سرانجام رساندن آن ضروری بوده است. دانشی که به‌وضوح در جنس لوله‌هایی که به فراخور نیاز به کار رفته و استفاده از پمپ آب جهت ارسال آب به طبقات بالایی کاخ کاملاً مشهود است.

گالدیری در بررسی سیستم آب‌رسانی کاخ، علاوه بر ترسیم بخشی از مسیرها، به جنس و مواد به کار رفته در ساخت لوله‌ها نیز می‌پردازد (زاندر، ۱۳۹۶: ۳۱۱). وجود سه مادهٔ مختلف سفال، مس و سرب بر حسب محل عبور و فشار وارده به آن گواه دانش و آگاهی سازندگان و وقوف کامل به ویژگی‌ها و خاصیت مواد و مصالح مورد استفاده در سیستم آب‌رسانی بنا دارد (نقشه ۳). اگرچه قسمت اعظم لوله‌ها از بین رفته‌اند، اما بخش‌های برجای ماندهٔ فلزی که در معرض دید نیستند، جنس سربی و مسی بودن آن‌ها را تأیید می‌کند. طبق ضابطهٔ $P=\frac{UTS\times T(mm)}{R(mm)}$ (ضخامت لوله × مقاومت کششی نهایی مواد / شعاع لوله = فشار) ضخامت لوله و قطر آن تأثیر مستقیمی بر تحمل فشار وارده به لوله دارد. از این‌رو در مسیرهایی که فشار بالایی به لوله‌ها وارد می‌آمده است، مهندسان دربار با علم به این واقعیت از قطر کم (حدود ۸ سانتی‌متر) و ضخامت بالا (حدود ۷ میلی‌متر) در ساخت لوله‌ها استفاده کرده‌اند. برای آنکه قطر کم لوله‌ها خللی در میزان دبی ارسالی آب به طبقات بالا ایجاد نکند از دو لولهٔ سربی موازی کنار هم به دلیل مقاومت کششی بالای سرب در مخازن R2, R1 و R3 استفاده نموده‌اند. همان‌طور که سابقهٔ استفاده از فلز در ساخت لوله‌های انتقال آب را می‌توان دست‌کم تا قرن پنجم ه. ق. ردیابی کرد (کرجی، ۱۳۷۳: ۳۸).



نقشهٔ ۳: شبکهٔ مشهود لوله‌های آب‌رسانی سفالی و فلزی و چگونگی ارتباط آن‌ها با مخازن و حوض‌های واقع در برج آب (نگارندگان)

Map3:The visible clay and metal water supply pipes and how they are connected to the reservoirs and ponds located in the water tower (Authors)

برای جلوگیری از نشتی و محافظت هر چه بیشتر محل اتصالات لوله‌ها و حصول اطمینان از مقاوم بودن در برابر مصالح ساختمانی، دور آن را با نوارهای پارچه‌ای و ماده‌ای از جنس موم می‌گرفته‌اند و آن‌گونه که گالدیری عنوان می‌کند، همین علت مانع از زنگ‌زدگی لوله‌ها طی قرون گذشته بوده است (همان، ۳۱۲).

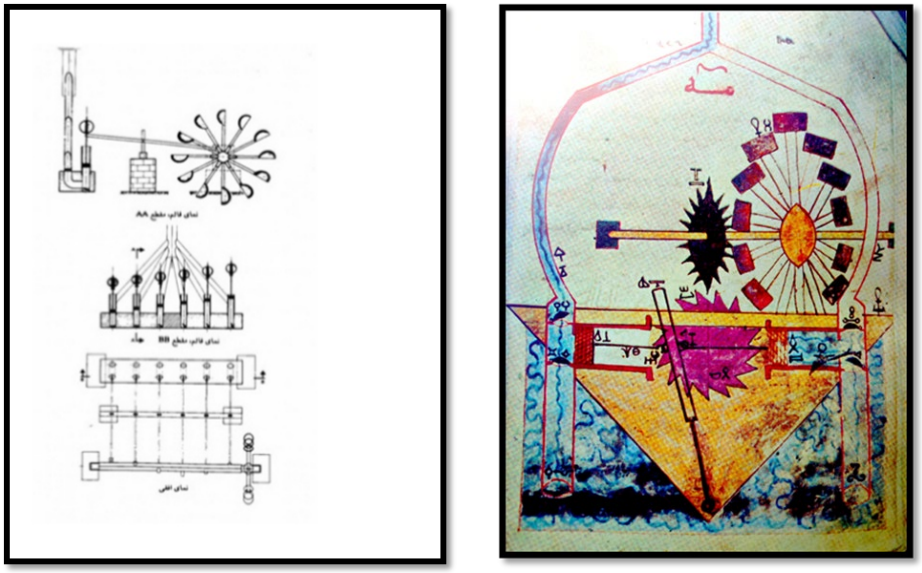
۷. عملکرد پمپ آب در کاخ عالی‌قاپو

فصل مشترک سفرنامه‌نویسانی که به سیستم آب‌رسانی کاخ اشاره کرده‌اند، وجود نیروی گاو جهت استخراج آب و ماشینی پمپ کننده است که باعث انتقال آب به طبقات فوقانی کاخ و در نتیجه به کار افتادن فواره‌های حوض مسی تالار می‌شد؛ اما این‌که آیا علاوه بر نیروی حیوانی، از نیروی انسان نیز برای تکمیل کار ماشین استفاده می‌شده تا کنون مطلبی در هیچ یک از مکتوبات تاریخی بیان نشده است. هرچند ساخت ماشینی تمام خودکار که تنها با اتکای نیروی چهارپایان قادر بود آب را تا ارتفاعی بالای ۱۴ متر پمپ کند، در چندین قرن قبل از روی کار آمدن صفویان انجام شده بود (حسن و هیل، ۱۳۷۵: ۶۷-۷۲). گالدیری ابزاری شبیه به دم آهنگری را برای سیستم آب‌رسانی کاخ متصور شده و محل آن‌ها را روی حفره‌های سینی‌های SP1 و SP2 عنوان می‌کند که توسط هنرفر نیز تأیید شده است (هنرفر: ۴۲۲، Galdieri: 67). به زعم او دم‌ها از طریق مکش، آب را به طبقات بالا هدایت و به این طریق حوض‌های طبقات دوم و سوم را پر می‌کردند، اما چنین فرضی به چند علت قابل قبول نیست. نخست، دستگاه دمی که بتواند آب را تا ارتفاع بالاتر از ۶ متر مکش کند باید به اندازهٔ لازم بزرگ باشد تا نیروی مورد نیاز جهت دمیدن هوا در لوله‌ها را فراهم آورد و فضای کم در محل قرارگیری دم، با احتساب یک یا دو نفر برای به کار انداختن آن اجازهٔ چنین عملی را نمی‌دهد. دوم، وجود نیروی انسانی برای به کار انداختن چنین وسیله‌ای و میزان انرژی مصرفی برای آن است، به نحوی که هرگونه وقفه‌ای در سیستم، منجر به اخلال در آب‌رسانی به حوض‌ها و قطع شدن چرخهٔ آب می‌شود. از طرفی نیروی بیش از اندازه و سرعت بالا در امر مکش نیز سبب سرریز شدن آب از صفحات سنگی و آبراهه‌های سنگی متصل به حوض‌ها می‌گشت. در نهایت وجود دو مخزن مجزا (R2,R1: نقشه ۱ و ۲) و یک کانال (P: نقشه ۱ و ۲) (تصویر ۱۳) در طبقهٔ اول است که نشان از نظامی غیر از دم‌آهنگری به ما می‌دهد. روشی که علاوه بر نداشتن محدودیت‌های دستگاه فوق قادر بود عمل پمپاژ آب به طبقات بالا و به کار انداختن فواره‌ها را بدون نقص انجام دهد.

تصویر ۱۳: قسمت PP روی نقشهٔ ۳ و محل قرارگیری احتمالی پمپ پیستونی طبقهٔ دوم (نگارندگان، بهار ۱۳۹۹)
Figure 13: part of PP on map of No. 3 and the possible location of the piston pump on the second floor (Authors, 2020)

در تاریخ مورد بحث و قرون پیش از آن به نظام‌های مختلفی جهت استحصال و انتقال آب برخورد می گردد که از آن میان طرح یک ماشین پمپ آب توسط الجزری (قرن ۶-۷ ه.ق.)، متشکل از لوله‌های مکش،

تخلیه و ترکیبی از پیستون‌ها بر جای مانده است (حسن و هیل: ۶۷-۷۲). این طرح بعدها در قرن دهم ه. ق. توسط تقی الدین راصد (وفات ۹۹۳ هق.) دانشمند دربار عثمانی شکل کامل‌تری به خود گرفت و دستگاه او قادر بود با کمک شش سیلندر یکپارچه، آب را به ارتفاع بالا پمپ کند (همان: ۶۷-۷۲). با بررسی نمونه‌های مذکور و ساختار معماری طبقهٔ اول برج آب در قسمت‌های R2, R1 و PP (نقشه ۱ و ۲) می‌توان امکان قرارگیری ماشین در این بخش از بنا را به‌خوبی متصور شد (تصویر ۱۴).

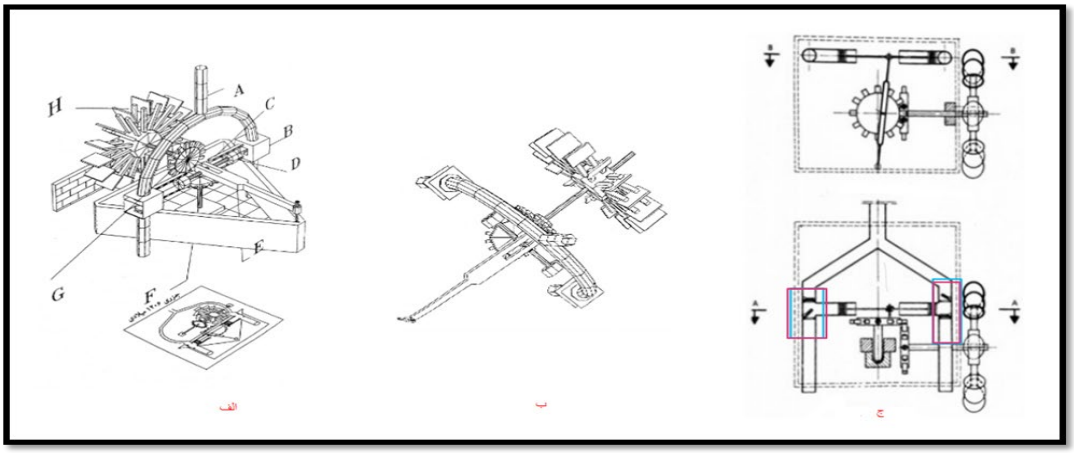


تصویر ۱۴: پمپ پیستونی الجزری (تصویر راست) (الجزری،۱۳۸۰: ۴۷۵)، طرح پمپ پیستونی توسط تقی الدین راصد (تصویر چپ) (حسن و هیل، ۱۳۷۵: ۷۱)
Figure 14: Al-Jazari piston pump (right picture), (Al- Jazari, 2001: 475), piston pump design by Taghi-edin- Rased (left picture) (Hasan, Hill, 1996: 71)

۸. چگونگی عملکرد ماشین پمپ الجزری و شباهت آن با یافته‌های به دست آمده در کاخ عالی‌قاپو

بدیع‌الزمان ابو اعز بن اسماعیل بن الرزاز الجزری در دیار بکر به شرح و بسط پنجاه دستگاه از اختراعاتش با جزئیات فنی و نحوهٔ عملکرد آن‌ها در زمینهٔ آب و آب‌رسانی، از جمله ساخت شیرهای مخلوط، انواع فواره‌ها که در فواصل زمانی معین فوران می‌کردند و در نهایت وسایل آب‌رسانی از نهر و چاه می‌پردازد (الجزری،۱۳۸۰: ۴۷۴-۴۷۶). در فصل مربوط به ماشین‌های آب‌رسانی کتاب الجزری، یکی از ماشین‌هایی که با ساختار معماری برج آب هماهنگی بیشتری دارد و چگونگی کارکرد آن توسط الجزری و در زمان متأخر توسط دونالد راتلیج هیل[1] شرح و بسط یافته، ماشینی پیستونی است که قادر بود آب را تا ارتفاع ۱۴ متر پمپ کند (الجزری،۱۳۸۰: ۴۷۴-۴۷۶؛ هیل، ۱۳۹۳: ۱۳۱-۱۳۳) (تصویر ۱۵).

1. Donald Routledge Hill.



تصویر ۱۵: طرح ماشین پیستونی الجزری توسط دونالد هیل (هیل، ۱۳۹۳: ۱۳۲-۱۳۳ تصاویر الف و ب) (حسن و هیل، ۱۳۷۵: ۷۰ تصویر ج)
Figure 15: Al- jazari piston pump design by Hill (Hill, 2014: 132-133; Hasan, Hill, 1996: 70)

مقاطع مختلف از تصویر پمپ مذکور در تصویر ۱۵ نشان‌دهندهٔ چرخ پره‌دار (حرف H تصویر الف) است که در امتداد محور چرخ دندهٔ G نصب می‌گردد و این چرخ دنده با چرخ دندهٔ افقی F که بر سطح بالایی آن میخی قائم نصب شده درگیر می‌شود. این میخ داخل شکاف میلهٔ E متصل و دو میلهٔ متصل به آن حامل دو پیستون D هستند که قادرند در داخل سیلندرهای C حرکت کنند. در انتهای هر سیلندر یک محفظهٔ شیر وجود دارد که با علامت B نشان داده شده‌اند. لوله‌های مکش از پایین محفظهٔ مثلثی وارد آب می‌شوند و لوله‌های تخلیه از بالای آن خارج می‌گردند. در دهانهٔ هر دو لوله شیرهای یک طرفه‌ای[۸] برای مکش و تخلیه تعبیه گردیده‌اند که این لوله‌ها در بالای ماشین به هم متصل شده و تشکیل لولهٔ مشترک A را می‌دهند. لوله‌ای که قادر است آب را با فشار زیاد تا ارتفاع بالا پمپ کند (هیل: ۱۳۱). طرز کار پمپ الجزری بدین گونه است که حرکت چرخ پره‌دار باعث حرکت چرخ دندهٔ قائم می‌گردد و این چرخ‌دنده به نوبهٔ خود موجب حرکت چرخ دندهٔ افقی می‌شود. به علت رفت و برگشتی بودن میلهٔ شکاف‌دار که در قسمت میانی پمپ واقع است، هر بار که پیستون در جهت فشار آب و پمپ آن به بالا حرکت می‌کند در سوی دیگر آن شیرهای یک طرفه باز و آب وارد این مسیر می‌گردد و با حرکت پاندول‌وار پمپ، آب در لوله‌های تعبیه شده در دو سوی پیستون به بالا هدایت می‌شود. اگرچه قسمت اعظم ماشین الجزری از جنس چوب بوده است اما بخش‌هایی نظیر سیلندر و پیستون‌ها به علت عملکرد و فشار وارده بر دستگاه از جنس مس ساخته شده بود (همان: ۱۳۱-۱۳۲). به علت همراستا بودن منبع آب (حوض مادر) با پمپ پیستونی، حرکت پیستون بر خلاف پمپ الجزری افقی (به صورت چپ و راست) و نه بالا و پایین بود. این موضوع نشان از آشنایی محققان دورهٔ صفوی با چنین اندیشه‌هایی داشت که بر اساس آن ساختار پمپ آب با تفاوت‌های اندکی با دستگاه پمپ الجزری طراحی شد و امکان انتقال آب به طبقات بالا را فراهم می‌آورد. نظامی که قادر بود تنها با نیروی چارپایان عمل گردش آب در کاخ را انجام دهد و دخالت انسان را به حداقل برساند. آنچه پلان و ساختار برج آب نشان می‌دهد گویای این امر است که آب پس از ریخته شدن در حوض مادر (P1)، به واسطهٔ نیروی گاو(ها)، توسط سیستم پیستونی واقع در کانال طبقهٔ اول (PP) و دو مخزن آن(R2,R1) با کمک لوله‌های تعبیه‌شده به طبقهٔ دوم رسیده و در نهایت به حوض P2 می‌ریخت. جهت پمپ آب از طبقهٔ دوم به طبقهٔ سوم باید از شواهد اتاقک شرقی (نقشه ۱-۲) این

طبقه نام برد که گمان می‌رود محل یکی از سه ماشین نام برده شده در توصیف شاردن و مربوط به نظام پمپ کنندهٔ آب در این طبقه باشد. علاوه بر آن فضای کافی در محیط پیرامونی حوض طبقهٔ دوم (P2) برای برپایی نظامی متشکل از چرخ دنده‌ها و رابط‌های آن به منظور مکانیزه کردن کار وجود دارد و می‌توان به راحتی چنین نظامی را در جهت پمپاژ آب از این طبقه به طبقهٔ سوم سوار کرد.

۹. نتیجه

با نگاهی به سازهٔ برج آب می‌توان به‌وضوح دید که ساختار و اسکلت آن به گونه‌ای است که علاوه بر معماری تخصصی سازه که به منظور آب‌رسانی به حوض ایوان و گردش کار فواره‌ها طراحی شده، دارای یک نقشه و طرح مجزا مربوط به تأسیسات آب‌رسانی بوده که با ساخت اسکلت بنا اجرا شده است. نقشه‌ای هوشمندانه که محل دقیق هر یک از بخش‌ها و اجزاء سیستم پیچیدهٔ آب‌رسانی کاخ را جهت عملکرد دقیق، معین و مشخص می‌کرد. از این روی گزافه نیست که بخش الحاقی کاخ عالی‌قاپو را در شمار سازه‌های باقی ماندهٔ معماری در ایران دانست که نقشهٔ ساختمان و نقشهٔ تأسیسات آن توأمان اجرا شده است. با وجود پاره‌ای از شواهد همانند گفته‌های سیاحان و تأکید بر واژهٔ ماشین و ساختار مهندسی ویژهٔ برج آب که گویای دخالت حداقلی انسان در به حرکت درآوردن نظام گردش آب دارد، برخی ادله نیز مکانیزه بودن نظام آب‌رسانی کاخ را تقویت می‌کند. از جمله وجود کانال واقع در طبقهٔ اول (PP) برای یک نظام پیستونی و حفره‌های روی دیوارهٔ شمالی طبقهٔ اول برج آب (B) این گمان را تقویت می‌کند. حقیقتی مهم که می‌تواند گواهی محکم بر گفته‌های شاردن مبنی بر وجود سه ماشین که بالای هم قرار گرفته‌اند باشد؛ زیرا در فرض مطرح شده توسط نگارندگان نیز برای عملیات آب‌رسانی و گردش کار فواره‌ها احتیاج به سه ماشین بوده است که به ترتیب در طبقات همکف، اول و دوم قرار می‌گرفته‌اند. هرچند با توجه به تخریب‌ها و ویرانی‌های بخش‌های وسیعی از کاخ تا زمان پروژه مرمتی گروه ایزمئو، جانمایی دقیق بخش‌هایی از اتصالات نظام آب‌رسانی و اجزا این ماشین‌ها دشوار است، اما امید می‌رود با شبیه‌سازی نظام پمپ آب بتوان به عملکرد سایر اجزاء واقع در این سازه و محل دقیق‌تر قرارگیری این ساختار پی برد.

۷. سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از جناب آقای دکتر محمود فرزین استاد تمام رشته مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان، آقای دکتر داریوش حیدری بنی استاد مدعو دانشگاه هنر اصفهان، خانم دکتر فریبا خطابخش مدیر پایگاه جهانی نقش‌جهان و جناب آقای هادی الهیاری کارشناس ارشد ادارهٔ کل میراث فرهنگی استان اصفهان که ما را در امر مشاوره و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

پی‌نوشت

۱. مقالهٔ کنونی برگرفته از پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد در گروه باستان‌شناسی دانشگاه هنر اصفهان با عنوان «بررسی باستان‌شناختی سازه‌های آبی و مدیریت آب در مجموعه میدان نقش‌جهان اصفهان با تأکید بر دو بنای مسجد جامع عباسی و کاخ عالی‌قاپو» است که در سال ۱۴۰۰ نگارش شد.

۲. این بخش از عمارت به سبب مرمت‌های در دست انجام با انبوهی از مصالح ساختمانی و آوار ناشی از مرمت همراه بود و همین امر کار را برای گروه تحقیق با دشواری روبرو کرد و از همین روی تلاش شد تا بهترین تصاویر برداشت شود. در حدفاصل ماه‌های تیر تا مهرماه ۱۴۰۲ گروه مرمت به سرپرستی آقای حسین گلچین (پیمانکار مرمت) اقدام به استحکام‌بخشی و مرمت طبقات دوم و سوم برج آب کردند که در طی آن مسیر ورودی و خروجی حوض طبقهٔ دوم نمایان شد و فرضیهٔ مطرح‌شده مورد تأیید قرار گرفت. در کف‌سازی طبقهٔ سوم، حوض (P3) در حدود ۱۵ سانتی‌متر بالاتر از سطح اصلی قرار گرفت و صفحهٔ سنگی (SP3) به دلیل حفاظت از طبقهٔ پایین مسدود شد (تصویر ۱۱ راست).

۳. شاردن (346-344 :1811) در مورد ازاره‌ها، کتیبه‌ها و یکی از سنگاب‌های مسجد جامع عباسی نیز از واژه Jaspe استفاده کرده و با قطعیت می‌توان گفت که منظور وی سنگ مرمر است. همان‌طور که سانسون (58 :1695) و کمپفر (181 :1712) نیز از واژه Marber استفاده کرده‌اند.

۴. امروزه نیز به ترکیب‌هایی از عوامل غیرآلی که هدفشان تبدیل انرژی، انجام کار و افزایش قابلیت‌های مکانیکی یا حسی بدن انسان یا تقلیل دادن پدیده‌های حیات به یک نظم و قاعده‌مندی قابل اندازه‌گیری باشد ماشین اطلاق می‌شود (محبی، ۱۳۸۳: ۱۳۱).

۵. اگر فرض را بر ثبات فشار در خط لوله بگذاریم، آب خروجی فواره‌ها به علت فشار بالای ناشی از اختلاف ارتفاع به بیش از ۸ تا ۱۰ متر پرتاب می‌شد و با توجه به ساختار سقف تالار و سازهٔ چوبی آن چنین چیزی امکان پذیر نبود. در یکی از ملاقات‌ها با مرحوم جمشید مظاهری (اصفهان شناس) ایشان به خانه‌ای نوساز در جنوب رودخانه اشاره کردند که سازنده آن با کمک تنبوشه‌های به دست آمده در زمان ساخت، آب را به حوض زیرزمین منتقل می‌کرد. به این ترتیب شاید مسیرهای انتقال آبی از کوه به جنوب رودخانه قابل بررسی باشد.

۶. طی مصاحبهٔ مهرماه ۱۳۹۸ شمسی با آقایان عبدالله جیل عاملی و احمد منتظر مدیران پیشین میراث فرهنگی استان اصفهان و آقای رضا منشئی مرمتگر کاخ عالی‌قاپو در دههٔ ۸۰ تا ۹۰ هجری شمسی.

۷. به این علت که حوض مذکور منبع اصلی تغذیهٔ سایر بخش‌های نظام آب‌رسانی بوده است در این پژوهش به این عنوان نامیده شد.

۸. در تصویر ۱۵ بخش ج در مقطع تصویر قسمتی که شیرهای یک طرفه وجود دارند مشخص شده است.

منابع

ابوئی، رضا (۱۳۷۷)، *پایان‌نامه امکان‌سنجی احیای میدان نقش‌جهان با توجه به وضع موجود و گذشته تاریخی*، دانشگاه هنر اصفهان، منتشرنشده.

الجزری، ابی العز بن اسمعیل (۱۳۸۰)، *الجامع بین العلم و العمل النافع فی صناعة الحیل*، ترجمهٔ محمدجواد ناطق و دیگران، چاپ اول، تهران، دانشگاه تهران.

بابایی، سوسن، (۱۳۹۸)، اصفهان و کاخ‌هایش، ترجمهٔ مصطفی امیری، چاپ اول، تهران، فرهنگ جاوید.

تاورنیه، ژان باتیست، (۱۳۸۹)، سفرنامه تاورنیه، ترجمهٔ حمید ارباب شیرانی، چاپ اول، تهران، نیلوفر.

تحویلدار، میرزا حسین‌خان، (۱۳۸۸)، جغرافیای اصفهان، چاپ اول، تهران، اختران.

جابری انصاری، حسن، (۱۳۷۸)، تاریخ اصفهان، تصحیح جمشید مظاهری، چاپ اول، اصفهان، مشعل.

حسن، احمد یوسف و دانالد هیل، (۱۳۷۵)، *تاریخ مصور فنّاوری اسلامی*، ترجمهٔ ناصر موفقیان، چاپ اول، تهران، علمی و فرهنگی.

حسینی ابری، حسن، (۱۳۷۹)، *زاینده‌رود از سرچشمه تا مرداب*، چاپ اول، اصفهان، گلها.

رفیعی مهرآبادی، ابوالقاسم، (۱۳۵۲)، *آثار ملی اصفهان*، چاپ اول، تهران، انجمن آثار ملی.

زاندر، جوزپه، (۱۳۹۶)، گزارش مرمت بناهای تاریخی ایران (گزارش‌ها و رساله‌های ایزمئو)، ترجمهٔ اصغر کریمی، چاپ اول، تهران، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری.

سانسون، نیکلاس، ۱۳۴۶، *سفرنامه سانسون* (وضع کشور شاهنشاهی ایران در زمان شاه سلیمان صفوی)، ترجمهٔ علی تفضلی، چاپ اول، تهران، ابن‌سینا.

شاردن، ژان، (۱۳۷۴)، *سفرنامه شاردن*، ترجمهٔ اقبال یغمایی، جلد چهار، چاپ اول، تهران، توس.

شاملو، ولی قلی، (۱۳۷۱)، قصص الخاقانی (تاریخ مختصر صفویه)، چاپ اول، تهران، وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی.

کریمی، خاطره، (۱۳۸۲)، *گزارش تعمیرات بنای تاریخی توحید خانه از سال ۱۳۵۶ تا ۱۳۷۹ ه.ش*، اداره کل میراث فرهنگی استان اصفهان.

کارری، جووانی فرانچسکو جملی، (۱۳۸۳)، *سفرنامه کارری*، ترجمهٔ عباس نخجوانی و عبدالعلی کارنگ، چاپ دوم، تهران، علمی و فرهنگی.

کاظمی سوچلمایی، محمد و مسعود تابش، (۱۳۹۷)، *بررسی تاثیر عوامل مؤثر بر تغییر ضریب زبری هیزن ویلیامز لوله‌های چدنی در طول دوره بهره‌برداری*. فصلنامه علمی- ترویجی علوم و مهندسی آب و فاضلاب، دورهٔ سوم، شمارهٔ ۲، زمستان، صص: ۲۳-۳۴.

کرجی، ابوبکر، (۱۳۴۵)، *استخراج آبهای پنهانی*، ترجمهٔ حسین خدیوجم، چاپ اول، تهران، بنیاد فرهنگ ایران.

کمپفر، انگلبرت، (۱۳۶۳)، *سفرنامه کمپفر*، ترجمهٔ کیکاووس جهانداری، چاپ اول، تهران، خوارزمی.

کنبی، شیلا (۱۳۸۵)، *هنر و معماری صفویه*، ترجمهٔ مزدا موحد، چاپ دوم، تهران، مؤسسه تألیف ترجمه و نشر آثار هنری متن.

گالدیری، اوژینو (۱۳۶۲)، عالی‌قاپو، ترجمهٔ عبدالله جبل عاملی، چاپ اول، تهران، سازمان ملی حفاظت آثار باستانی.

محبی، پرویز (۱۳۸۳)، فنون و منابع در ایران، ترجمهٔ آرام قریب، چاپ اول، تهران، اختران.

همایی شیرازی اصفهانی، جلال‌الدین (۱۳۸۴)، *تاریخ اصفهان (ابنیه و عمارات اصفهان و آثار باستان)*، چاپ اول، تهران، هما.

هنرفر، لطف‌الله (۱۳۵۰)، گنجینه آثار تاریخی اصفهان، چاپ اول، اصفهان، کتابفروشی ثقفی.

هیل، دونالد راتلیج (۱۳۹۳)، تاریخ تحلیلی علم و فناوری در جهان اسلام، ترجمهٔ سعید رفعت جاه، چاپ اول، تهران، جوانه رشد.

Abuee. R, 1999. *The feasibility of revitalizing Naqsh-e- Jahan Square according to the current and past situation*, M.A thesis, Department of Restoration of the building, Isfahan university of art, Unpublished.

Aljazari, A. E. 2001. *Aljame Beyno-l Elm val Amal*, Translated by Mohammad. J. Nategh, No:1., Tehran published by Univercity of Tehran.[in Persain].

Babaie, S. 2017. *Isfahan and Its Palaces*, Translated by Mostafa Amiri, No:1., Tehran published by Farhang-eJavid. [in Persain].

Canby, sh., 2006, *Safavid Art and Architecture*, Translated by Mazda Movahed, No:2., Tehran published by Matn. [in Persain].

Galdiery, o., 1979, *Esfahan, Ali Qapu: an architectural surve*: Rome.

Hill, D. R. 2014. *Islamic Science and Engineering*, Translated by Saeed Rafat jah, No:1., Tehran published by javane Roshd.[in Persain].

Hasa, A. Y., Hill, D. R. 1995. Illustrated history of Islamic technology, Translated by Naaser Movafaghian, No:1., Tehran published by Elmi Farhangi.[in Persain].

Homaee, SH. E. J. 2005. *Hisory of Isfahan*, No:1., Tehran published by Homa.[in Persain].

Honarfar, L. 1971. *Isfahan Historical Treasure*, No:1., Isfahan published by Ketab froshi-e Saghafi.[in Persain].

Hosayni Abari. H. 2000. *Zaiandeh rud from its source to the mouth*, No:1., Isfahan published by Golha.[in Persain].

Jaberi.A, H. 1999. *Hisory oe Isfahan*, No:1., Isfahan published by Mashaal.[in Persain].

Karaji. A. 1966. *Extraction of hidden waters*, Translated by Hosein khadiv Jam, No:1., Tehran published by Bonyad-e- Farhang-e- Iran.[in Persain].

Kazemi Sochelmae. M, Tabesh. M. 2018. Investigating the effect of factors affecting the change of the Hazen- Williams roughness coefficient of cast iron pipes during the operation period. Water and sewage engineering sciences 3 (2): 23-34.

Mohebi, P. 2004. *Technologies and Resources in Iran*, Translated by Aram Gharib, No:1., Tehran published by Akhtaran.[in Persain].

Rafiee Mehrabadi, A. 1973. *Isfahan National Monuments*, No:1., Tehran published by Anjoman Asar-e Melli.[in Persain].

Shamlou, V. 1992. *Gesasol khaghani*, No:1., Tehran published by Vezarat-e Ershad.[in Persain].

Tahvildar, M. H. 2009. *Geography of Isfahan*, No:1., Tehran published by Mashaal (in Persain].

Zander, J. 2017. *Izmeo Reports*, Translated by Asghar Karimi, No:1., Tehran published by Miras-e Farhangi.[in Persain].

Chardin, J., 1811, *Voyages Du Chevalier Chardin En Perse*, Lenormant Imprimeur Libraire.

Sanson, N. 1695. Voyage Ou Relation De Letat Present Du Royaume De Perse: Chez la Veuve Mabre Cramoisi, Paris.

Tavernier, J. B. 1676. *Voyages Tavernier En Turquie*, *En Perse*, *Et Aux Indes*, Chez Gervais Clouzier et Claude Barbin, A Paris.

Careri, D.G.F, 1708, *Voyage du tour du monde,* Giuseppe Rotelli, In Napolt.

Kaempfer, E. 1712. *Amoenitatum Exoticarum Politico-Physico-Medicarum Fasciculi V Quibus continentur (ets)*, Typis & impensis Henrici Wilhelmi Meyeri, aulae Lippiacae typographi, Lemgoviae.

URL1:http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/machime] (accessed December 27, 2020).

URL: http://www.rajanews.com/news/189604 (accessed December 17, 2020.