دیدگاه

سیدعبدالعظیم امیرشاه‌کرمی[1]

بازخوانی مهندسی پل خواجو

پل خواجو در نگاه نخست اثری هنرمندانه از معماری صفوی است؛ اما برجستگی جلوه‌های هنری این بنا ارزشهای مهندسی آن را پنهان کرده است. خصوصیات مهندسی پل بازخوانی آن را در ردیف مهندسی تحلیلی قرار می‌دهد؛ مهندسی‌ای که با کیفیت و کمیت زمانی و مکانی ارتباطی تنگاتنگ داشته و درک آن از راه تحلیل و مدل‌سازی ممکن است.

پل خواجو مثالی مناسب در به‌کارگیری مهندسی تحلیلی، یعنی استفاده هم‌زمان و هماهنگ از سیستم مدیریت شهری و روشهای مهندسی هیدرولیک و سازه است که با تحلیل خصوصیات سازه و معماریِ آن روشن می‌شود. این مثال ماندگار و کارآمد در زمان خود، همراه با دیگر تأسیسات تأخیرانداز، مادیها، بندها، باغها و درختان شهری، فضای زیست‌محیطی شهر کویری را از رطوبت مناسب برخوردار می‌کرد. مکان‌یابی پل در مهار و جهت‌دهی و ذخیرهٔ سفره‌های آب زیرزمینی، هوشمندانه است. ۲۱ کانال اصلی و دیگر ظرایف کالبدی در ورودیها و سکوها از تلاطم و سرعت آب می‌کاهد. با استهلاک نیروی مخرب آب در تغییر مسیرهای درونِ کالبد و مواجههٔ سطوح و جریانات آب با یکدیگر، در پایین‌دست پل حوضچهٔ آرامشی ایجاد می‌شود که در آن ماهی هم پرورش می‌داده‌اند.

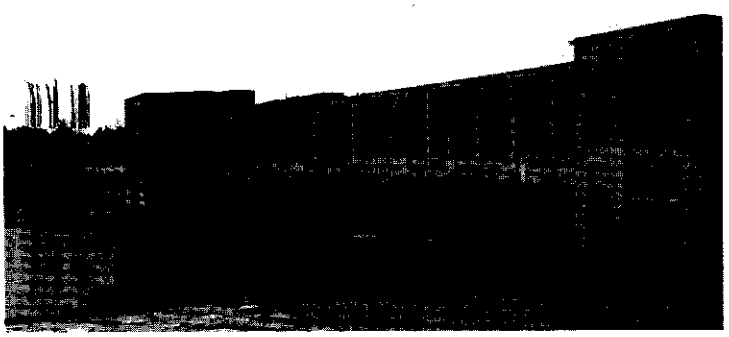
توجه به این جنبه‌ها در طرّاحی بناهایی مانند پل خواجو دیدگاه و روش ما را در پژوهشهای تاریخی دگرگون می‌سازد. با اعتقاد به تحلیلها و مدل‌سازیهایی که از نمونه‌های تاریخی به‌دست می‌آید و استفاده از آنها در معماری و آبادانی کنونی کشورمان، اهمیت و نقش این‌گونه جستجو و تحلیل نمایان می‌شود.

۱. مقدمه

اصفهان را شهر هنر و هنرمندان می‌دانیم و همواره و همه جا از آثار هنری گونه‌گونِ آن که روح معنویت را در کالبد شهر دمیده‌اند و از هنرمندان بزرگی که در آن شهر زیسته‌اند سخن می‌گوییم و می‌شنویم. این‌گونه سخن‌گفتن از اصفهان تازگی ندارد؛ چه، محققان و جهانگردان شرقی و غربی، به‌ویژه از عهد صفویان به بعد، از قالها و حالهای آثار و جایهای گوناگون این شهر بسیار نوشته‌اند و می‌نویسند.

اما درخشش آثار هنری اصفهان، که تا کنون توجه پژوهشگران به آنها معطوف بوده و هنوز هم به‌حق توجهی بیشتر بدانها لازم است، سبب شده که ارزشهای دیگر این شهر تاریخی ناشناخته بماند. از جملهٔ آنها، ارزشهای قابل بازخوانی در مهندسی پل خواجوست، که در این مقاله بدانها می‌پردازیم. این دسته از ارزشها، گرچه با معیارهایی متفاوت از ارزشهای هنری قابل شناسایی و معرفی است، به‌کل مستقل از آن ارزشها نیست؛ زیرا مهندسی است که امکان حضور خیل هنرمندان برجسته و ظهور آثار فراوان هنری را برای اصفهان فراهم کرده است.

این سخن را می‌توان با مثالی روشن‌تر کرد. کاشی، که در عین زیبایی‌اش حافظ جدار بیرونی بناست، خود با رویه‌ای از لعاب حفظ می‌شود و به سبب همین رویه، در برابر عوامل مخرب پایدار می‌ماند. پس ماندگاری کاشی به سبب و به پشتوانهٔ علم و مهندسی است؛ و در عین آنکه بررسی ارزشهای جمالی و ظاهری کاشی مهم است، کافی نیست. ویژگیهای میکروسکوپی مواد تشکیل‌دهندهٔ لعاب و بدنهٔ کاشی و پیوستگی میان لایهٔ لعاب و بدنهٔ کاشی و ساختمان، یعنی آنچه سبب ماندگاری کاشی و ساختمان می‌شود، همگی کمّی و عددی و دارای روابط فیزیکی ـ شیمیایی، و به همین ترتیب قابل بازخوانی است. بی‌توجهی به این روابط و ظرایف آن به‌راستی بی‌توجهی به بخشی از ارزشهای نمادین کاشی نیز هست؛ چراکه در این صورت خواهیم پنداشت که کاشی و نقوش آن چنان سهل به‌دست آمده که به جای آن‌گونه که هست، می‌توانسته هر گونهٔ دیگری نیز باشد و چیزی جز خواست و سلیقه در شکل دادن به آن نقش نداشته است. توجه به ارزشهای مهندسی در آثار هنر تاریخی افزون بر آنکه سبب آشنایی ما با بخشی از دستاوردهای اندیشمندان



ت ۱. پل خواجو، نمای غربی (بالادست پل)

متقدم کشورمان می‌شود، این نکته را نیز می‌تواند به‌خوبی روشن کند که ایجاد آثاری شگفت‌انگیز مانند پل خواجو تا چه اندازه پرزحمت و دقیق بوده است.

عناصر و اجزای تشکیل‌دهندهٔ شهری همچون اصفهان، از کوچک‌ترین جزء تا کل شهر، مستقلاً و متفقاً با زمین و جوّ در کنش و واکنش است و پایداری آنها بدین واسطه تأمین می‌شود. آنچه وجود اصفهان را تضمین می‌کند و حضورش در سراسر این مجموعه حس می‌شود عبارت است از تنوع کیفی و کمّی مصالح، ترکیب و تجمیع و تناسب آنها با یکدیگر، بافتی به‌هم‌پیوسته و در هر موقع و مقام، متناسب با اوضاع و احوال پیش‌بینی‌شده، و سرانجام، رفتاری مناسب که حاصل هندسه‌ای مناسب است. نیاکان ما در اصفهان با ترکیب عاملهای یادشده مجموعه‌ای هوشمند و ماندگار پدید آورده‌اند که از مقیاس کل شهر تا کوچک‌ترین واحد تشکیل‌دهندهٔ شهر به شیوه‌ای ویژه بر پایهٔ مفاهیم و مبانی مهندسی قابل بازخوانی است. این مقاله تلاشی است برای چنین بازخوانی‌ای از مهندسی به‌منزلهٔ عامل وجود و بقای شهر اصفهان.

(1) Local

۲. نکاتی در معنای مهندسی و مراتب آن

پیش از آغاز این تلاش لازم است در واژهٔ «مهندسی» و معانی و مراتب آن تأمل کنیم تا به‌درستی مطلوب خود را از این بازخوانی روشن سازیم. مهندسی عبارت است از طرّاحی و ساختن چیزها با خلاقیت و مهارت.[۲] پس خلاقیت و مهارت در مهندسی اهمیت بنیادین دارد و شأن و مرتبهٔ کار مهندسی با خلاقیت و مهارتِ به‌کاررفته در آن سنجیده می‌شود. بر این اساس، می‌توان برای مهندسی سه مرتبه قایل شد: مرتبهٔ تجربی/ استقرایی، مرتبهٔ قیاسی، مرتبهٔ تحلیلی/ قدری/ ارزشی. مرتبهٔ اخیر نسبتی نزدیک‌تر با ریشهٔ فارسی واژهٔ مهندسی دارد. واژهٔ مهندسی از مصدر عربی «هندسه» و بدان واسطه از واژهٔ فارسی «اندازه» است[۳]. بحث دربارهٔ تعاریف و مفاهیم مهندسی در زبانهای گوناگون و تبارشناسی آنها نیازمند بررسی‌ای مستقل است. در اینجا هم‌تبار بودنِ لغوی مهندسی و اندازه برای این بررسی از آن جهت مهم است که نشان می‌دهد مهندسی با تعیین «قدر» چیزها نسبت دارد و در ذات خود امری «قدری» است. باید توجه داشته باشیم که قدر، هم به‌معنای «اندازه» است و هم به‌معنای «ارزش»؛ و در اینجا هر دو معنای آن مورد نظر است.

مهندسی در مرتبهٔ تجربی عبارت است از تکرار و بازسازی کامل یا نزدیک به کاملِ تجربه‌ای به صرف خواست انسان و غالباً به نحو صوری. در مهندسی تجربی، به خصوصیات محیط و نیازهای واقعی انسان توجه نمی‌شود؛ بلکه تنها متوجه «خواست» انسان است و به همین اندازه، از تفکر و خلاقیت راستین عاری است. این مرتبه را از آن جهت مهندسی می‌خوانند که محصول آن با محصول کارهای خلاقانهٔ راستین شباهت دارد.

مهندسی در مرتبهٔ قیاسی عبارت است از طرّاحی بر پایهٔ قواعد و ضوابط و آیین‌نامه‌هایی که آنها را از راه روشهای علمی برای موقعیتهای گوناگون تدوین کرده‌اند. در این مرتبه، کار مهندسْ طرّاحی در چهارچوب مجموعه‌ای از قواعد ازپیش‌معیّن است که کمابیش به یک اندازه خطا و خلاقیت را برای مهندس ممکن می‌کند. در این مرتبه از مهندسی، خلاقیتهای شخصی یا خلاقیتهای نهاده بر خصوصیات موقعی[۱] ممکن نیست.

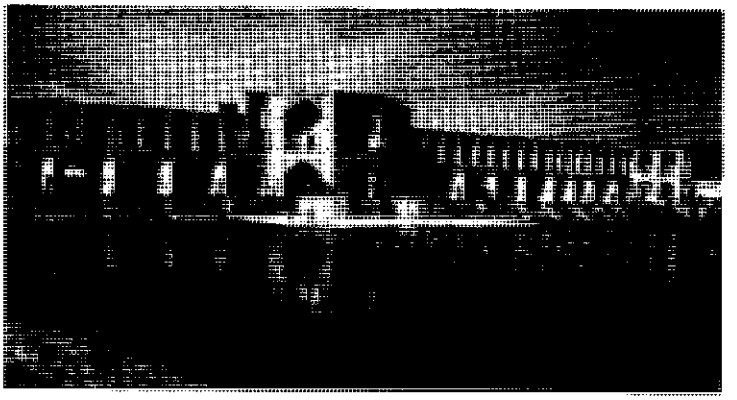
مهندسی در مرتبهٔ تحلیلی عبارت است از مهندسی‌ای نهاده بر خصوصیات محیطْ معین و تواناییهای انسان در تحلیل به‌کمک علوم پایه و تواناییهای او در اجرا. پس این مرتبه مهندسی‌ای است منحصر به یک موقع طبیعی و ماهیتاً تکرارناپذیر. تحقق اثر مهندسی تحلیلی نیازمند چهار مقدمه است: نخست، ریاضیات و شبیه‌سازی ریاضی برای شناخت جزء و کل و روابط میان اجزا و کل؛ دوم، قوانین کلی طبیعت (فیزیک) و شناخت موقع طبیعی بر پایهٔ آن؛ سوم، تجربه‌ها و ابزارها و فناوریهای موجود و قابل آفرینشِ مناسب طرح جدید؛ چهارم، شناخت توانمندیهای انسان، از جمله شناخت نبوغ و ابتکار فردی مهندس و توان او در به‌کار گیری فناوریهای بالفعل و بالقوه. مهندس

از راه شبیه‌سازی ریاضی طبیعت را بازخوانی می‌کند و از این راه اثر خود و طبیعت را به دو جزء ناگسستنی بدل می‌کند. بدین طریق، او می‌تواند ضرایب اطمینان مهندسی را به پایین‌ترین میزان ممکن برساند. اثر مهندسی‌ای که چنین با موقع طبیعی خود هم‌سرشت می‌شود، طبیعتاً تکرارپذیر نیست و به‌راستی اثری یکتاست. در مقام مقایسه و برای تقریب به ذهن، می‌توان گفت که مهندسی کنونی رایج در کشور ما از مرتبهٔ تجربی است؛ مهندسی کنونی رایج در اروپا از مرتبهٔ قیاسی؛ و مهندسی قابل بازخوانی در بسیاری از بناهای تاریخی کشورمان از مرتبهٔ تحلیلی یا قدری.

۳. پل خواجو و شناسایی لازم برای مهندسی تحلیلی

هر مرتبهٔ مهندسی آثار متناظر با خود پدید می‌آورد. پس بر اساس دسته‌بندی سه‌گانهٔ یادشده، سه گونه اثر مهندسی قابل بازشناسی است: اثر مهندسی تجربی، اثر مهندسی قیاسی، اثر مهندسی تحلیلی. بازخوانی و شناخت هر مرتبه از اثر مهندسی باید بر پایهٔ مبانی و روشهایی انجام شود که در پدیدآمدنش دخالت داشته است؛ یعنی بر پایهٔ مرتبهٔ مهندسی متناظر خود. بررسی و بازخوانی مهندسی پل خواجو نشان می‌دهد که مبانی و روشهای مهندسی واقع در پس این پل تاریخی با مبانی و روشهای مهندسی تحلیلی، یعنی عالی‌ترین مرتبهٔ مهندسی، سازگاری دارد. این بررسی نشان می‌دهد که در اصفهان، از کلان‌ترین مقیاس، یعنی قرارگیری ساختار شهر در طبیعت و پیوند با آن؛ تا خردترین مقیاس، یعنی شیوهٔ به کار گرفتن مصالح در ساختمانها، که البته شامل ترکیب شیمیایی ملاطها و رنگها و لعابها نیز می‌شود، جریانی از تحلیل و مدل‌سازی در مقیاسهای گوناگون در کار است.

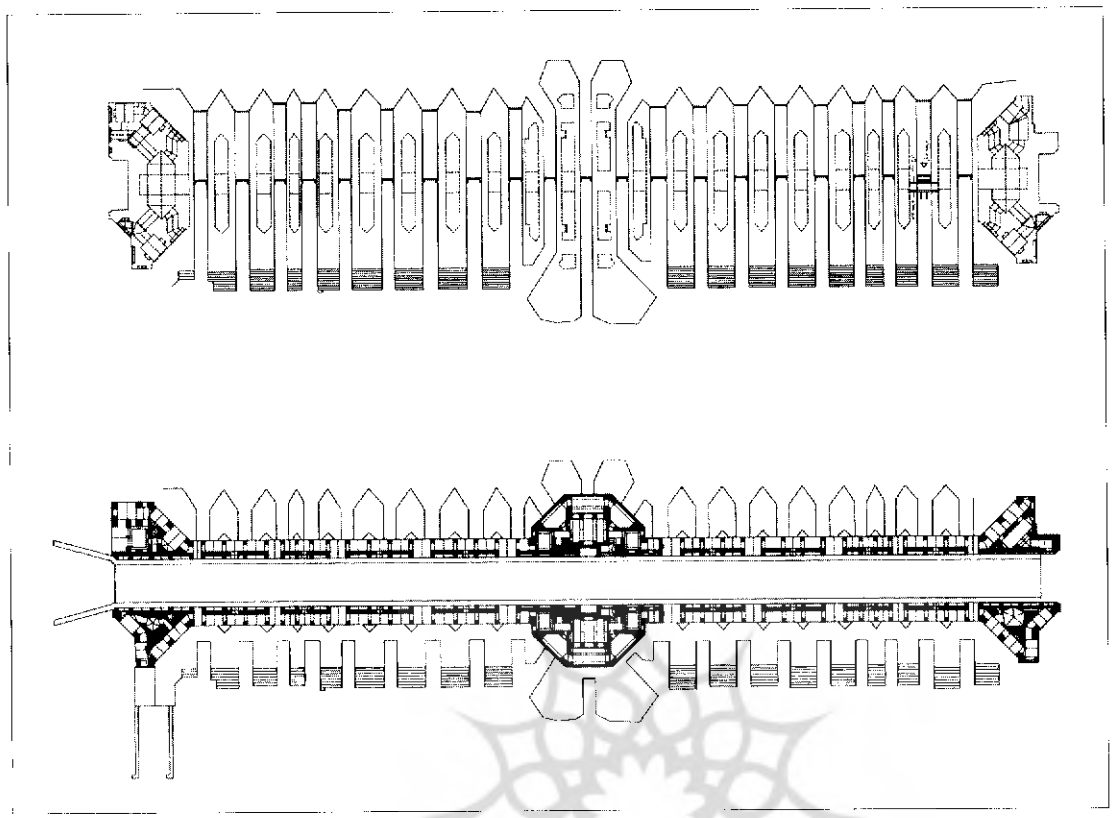
برای بازخوانی پل خواجو از منظر مهندسی تحلیلی باید تصوری واقعی از مقدمات لازم برای تحقق چنین اثر مهندسی‌ای داشته باشیم؛ یعنی از علم ریاضی و مدل‌سازی، علوم طبیعی، و فناوریهای موجود در زمان ساخت و کیفیت مدیریت آنها در اصفهان صفوی. در مقیاس کلان، لازم است نخست بدانیم که در چنین طرح مهندسی‌ای، چه علوم و فناوریهایی نقش داشته است و سپس کیفیت و کمیت آنها را در دورهٔ صفوی بشناسیم.



ت ۲. پل خواجو، غای شرقی (پایین‌دست پل). پل خواجو یکی از تفرجگاههای پرطرفدار در میان اصفهانیان است.

به سخن دیگر، باید بدانیم که سازندهٔ این اثر چگونه توانسته است پیوندی چنان ژرف میان ساختار طبیعت در مقیاسهای گوناگون و صورتهای ساختمانی و کارکردهای مورد نیاز انسان برقرار کند تا مهندسی‌ای چنین کارآمد را تصور و سپس طرّاحی و اجرا کند. پس مثلاً باید بدانیم که مهندس سازندهٔ پل خواجو چگونه و چه میزان شناختی از طبیعت و قوانین طبیعی داشته؛ با چه دقتی توانسته سطح زمین را اندازه‌گیری و رسم کند؛ چگونه توانسته مشخصات طبیعی محیط زیست را از پایین‌ترین لایه‌های زیر زمین تا سطح زمین و بالاترین لایه‌های جوّ، بشناسد؛ و در مقیاس خردتر، باید بدانیم که او چه شناختی از مصالح و پیوند متقابل آنها و نیز نسبت آنها با صورتهای ساختمانی داشته است. همچنین لازم است به میزان شناخت مهندس این پل از تواناییهای جامعه نیز توجه کنیم؛ زیرا توفیق در فرآوری و تولید مصالح و ساخت ابزار لازم برای چنین مهندسی‌ای بدون چنین شناختی ممکن نیست.

شناخت ابزار لازم برای ساخت اثری همچون پل خواجو نیز بسیار مهم است. یکی از علل این اهمیت نقش مؤثری است که در زدودن تصورات نادرست امروزین از حدود مهندسی و فناوری دوره‌های گذشته دارد. این را می‌توان به کمک مثالی روشن کرد: تصور وجود سیستمی برای پمپ کردن آب رودخانه در دورهٔ صفویانْ نخست موهوم و مبالغه‌آمیز می‌نماید؛ ولی هر مهندسی می‌داند که وجود چنین سیستمی شرط لازم برای ساختن سد و پل روی رودخانه است. پس بی‌گمان همهٔ کسانی که بر رودخانه پل بسته‌اند، از جمله سازندگان پل خواجوی اصفهان، بدین فناوری دسترس داشته‌اند. لازم است به همین ترتیب، از کمّ و کیف دیگر فناوریها و ابزارهای



ت ۳. پل خواجو، نقشهٔ پل در دو تراز، بالا: تراز پایه‌ها و کانالهای سنگی، پایین: تراز گذر

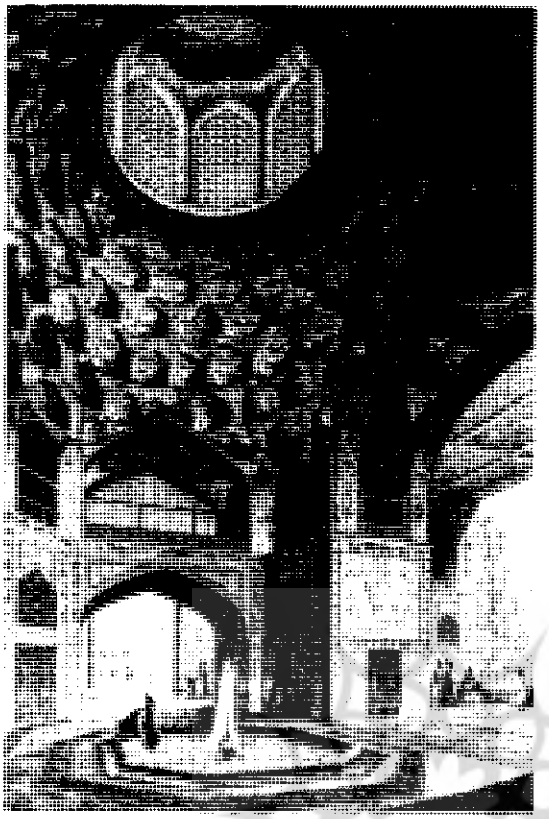
محاسبه و تحلیل و مدل‌سازی مؤثر در ساخت پل خواجو تصوری ملموس‌تر به دست آوریم.

بی‌گمان تحقق این خواسته‌ها چندان آسان و زودیاب نیست؛ زیرا از سویی، به مبانی و ابزار به‌کاررفته در ساخت پل خواجو دسترس مستقیم نداریم، و از سوی دیگر، برای شناخت آنها از راه شواهد، به پژوهشهای میان‌رشته‌ای بسیاری نیاز داریم. تا آن هنگام، در مواجهه با پل خواجو و دیگر آثار مانند آن نباید تصور رایج را قطعی بینگاریم و وجود فناوریهای یادشده را انکار کنیم.

۴. طرح چرخهٔ آب ـ انرژی در اصفهان و پل خواجو و تهیهٔ مدل تحلیل آنها

در تحلیل مهندسی پل خواجو، باید به چرخهٔ آب و انرژی و استفاده از آن در شکوفا کردنِ توانهای بالقوهٔ اصفهان از راه جریان بخشیدن به حیات در آن ــ یعنی در شهری که می‌بایست به منزلهٔ پایتخت پادشاهی‌ای معظم حفظ می‌شد ــ بپردازیم. بنا بر این، ناگزیر باید از مفاهیم آن دسته از علوم نوین کمک بگیریم که می‌توانند تبادل انرژی را در اصفهان توضیح دهند. برای معلوم کردن این علم کلیدی، باید نخست شناختی از طبیعت اصفهان داشته باشیم.

طبیعت اصفهان، بر خلاف بیشتر نقاط ایران، از لایه‌های زیرینِ زمین تا آسمانِ آن، ایستاست. این ایستایی سبب شده که در این شهر هیچ‌گاه مانعهایی جدی، چون زلزله و سیل، برای پیدایش حیات انسانی وجود نداشته باشد. از سوی دیگر، همین ایستایی سبب شده که منابع زیستی بالقوهٔ شهر کمتر امکان بالفعل شدن بیابد. اصفهان برای آنکه پایتخت حکومتی مقتدر مانند حکومت صفویان باقی بماند، بایست ظرفیتهایی فزون‌تر می‌یافت. برای این کار مهم در اصفهان، نخست باید انرژی و تبادل آن در مقیاسهای کلان و خرد، از زیر زمین تا بالاترین لایه‌های جوّ، به جریان می‌افتاد. مهم‌ترین عنصری که در همهٔ مقیاسها و عرصه‌های یادشده وجود دارد و میان آنها تبادل می‌شود آب است. مهندسان اصفهان متوجه شدند که باید آب را برای شهر، متناسب با جمعیت بسیار آن در نیمهٔ دوم دورهٔ صفویان، فراهم و حفظ کنند؛ و نیز دریافتند که آنچه می‌تواند مجموعهٔ زیستی ایستای شهر را به جنبش وادارد و زنده کند تبادل انرژی به‌واسطهٔ آب در شکلها



ت ۴ (راست). اصفهان در دورهٔ قاجار در نیمهٔ سدهٔ نوزدهم میلادی. نقشهٔ برداشت‌شده به‌دست ارتش دولت روسیه (بخشی از نقشه). باغهای پهناور اصفهان یادگار کارهای عمرانی دورهٔ صفوی هستند. مأخذ تصویر: اسناد تصویری شهرهای ایران

ت ۵ (چپ). منظرهٔ درونی کاخ هشت‌بهشت در سدهٔ یازدهم/هفدهم اثر پاسکال کست. حوض و چهار ایوان گشودهٔ کاخ و سقف آن در تصویر دیده می‌شود. مأخذ تصویر: *مجموعه آثار معماری سنتی ایران، دوره اسلامی*، ت ۳۸

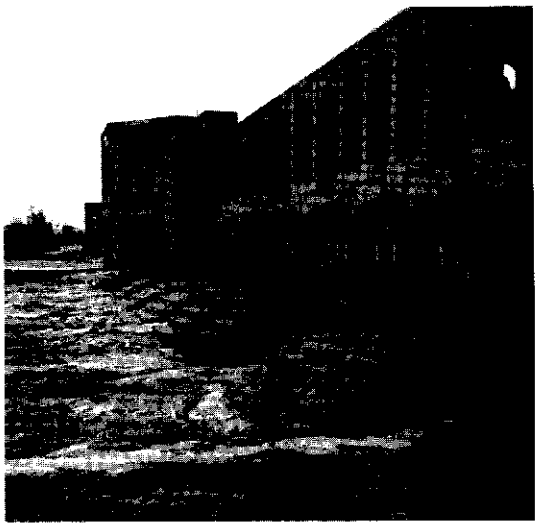
ت ۶ (بالا). نقشه و برش کاخ هشت بهشت، مأخذ تصویر: *Restoration of the Ali Qapu, Chehel Sutun, and Hasht Behesht, Isfahan, Iran, Major Restoration Completed 1977*, p. 196

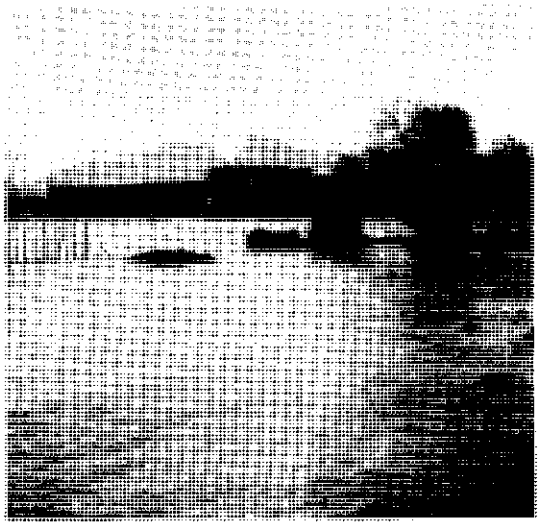
(مایع و گاز) و مقدارهای گوناگون (مولکول و قطره و حوض و جوی و رود) است. به همین سبب، می‌توان گفت که از میان همهٔ علوم نوین، مکانیک و دینامیک سیالات نقشی ویژه در باقی ماندن شهر اصفهان در مقام پایتخت صفویان داشته است. پس همین علم می‌تواند کلید بازخوانی مهندسی اصفهان باشد.

مهندسان عصر صفوی توانستند با تدابیری که به کمک مفاهیم علم مکانیک سیالات قابل‌توضیح است، هوا و آب، و بدان واسطه حیات را در کالبد اصفهان جاری کنند. مقیاس خردِ این تدبیر را در همهٔ بناهای شهر، به‌ویژه در عمارتهای هشت‌بهشت و چهل‌ستون، در جریان آب و هوا و تأثیر آنها در پیکربندی ساختمان و شکل‌گیری کف و سقف آنها می‌بینیم؛ و مقیاس کلانِ آن را در شبکهٔ مادیها و جریان هوا و تونل باد و آرایش بیشه‌ها و طرح‌ریزی خیابان چهارباغ و باغهای پهناور دورهٔ صفوی در پیوند با محیط طبیعی و مصنوع شهر (ت۴). این تدابیر در سه لایه، یعنی جوّ و روی زمین و زیر زمین، قابل شناسایی و بازخوانی است. مهندسان عصر صفوی آب را، گرچه برای ماندگاری مصالح ساختمانی مضر است، به درون بناهایی مانند هشت‌بهشت و چهل‌ستون آوردند تا محیط زیستی مطلوب برای انسان پدید آورند (ت ۵ و ۶). این کار با ایجاد جریان هوا در سطح و در ارتفاع با تکیه بر خواص آب و قوانین انرژی، با هدف ایجاد دما و رطوبت مطبوع برای انسان صورت گرفته است. آنان برای حفاظت از کالبد بنا در مقابل مضرات آب و رطوبت، به مهندسی ظریف‌تر و پیچیده‌تری مرکب از مهندسی محیط زیست و عمران دست یافتند. چنین است که متناسب با گونه‌گونی یادشده در کمّ و کیف آب موجود در اصفهان، در همهٔ عناصر آن، از ذره تا بی‌نهایت، مهندسی‌ای هماهنگ می‌یابیم.

۵. به‌کارگیری مهندسیهای وابستهٔ تحلیلی توأم در اصفهان

به‌کارگیری استادانهٔ درخت، یعنی تنها موجود زندهٔ حاضر در هر سه بخش محیط زیست (زیر زمین و روی سطح زمین و جوّ)، در سامان‌دهی درستِ نظام محیط زیست اصفهان، شاهدی است بر میزان فهم مهندسان عصر صفوی از محیط زیست موجود و مطلوب و تسلط





ت ۷ و ۸. پل خواجو در هنگام طغیان زاینده‌رود. شکل ویژهٔ خروجی کانالهای آب سبب می‌شود که انرژی آب با جریانهای متقاطع عمودی و افقی مستهلک شود. عکس از رابرت بایرن (۱۹۰۵–۱۹۴۱) ح ۱۹۳۳–۱۹۳۴، مأخذ تصویرها: Courtauld Institute of Art, A47/1630 & A38/414

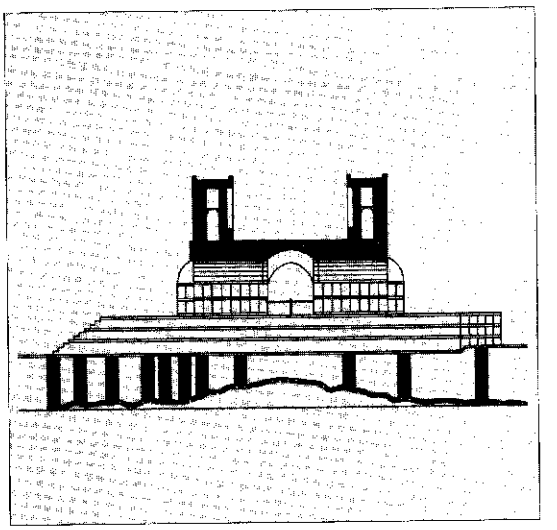
ایشان بر مهارتهای لازم برای ایجاد محیط زیست مطلوب. در اصفهان، جریان آب و هوا به شیوه‌ای که بی‌گمان نباید بدیهی‌اش پنداشت، بر یکدیگر منطبق‌اند. «آب» و «هوا»ی اصفهان، هر دو، از سوی غرب به شرق جریان دارند و در نتیجه، امکانات زیست همراه با آسایش را برای ساکنان شهر فراهم می‌آورند. مادیهای اصفهان، افزون بر ایجاد امکان ورود آب و هوا به شهر اصفهان، نقش بسیار مهم دیگری دارند که عبارت است از شستن مدام خاک پرنمک اصفهان و قابل کشت کردن آن. این تدبیرِ کلان با تدبیرهایی در مقیاسهای خردتر تکمیل شده است؛ و پل خواجو نقشی کلیدی در پیوستگی تدبیرهای مهندسی کلان و خرد در اصفهان دارد.

پیوستگی یادشده میان کیفیت تدبیرها و طرّاحیها در مهندسی کلان و خرد در اصفهان نشان می‌دهد که نظام تحلیلی کامل و دقیقی بر مهندسی آن حاکم بوده است. امروزه مهندسان از نرم‌افزاری واحد برای تحلیل نیروها و مدل‌سازی «انواع» مسائل مهندسی، از سد گرفته تا خانه، استفاده می‌کنند. پس مهندسان عصر صفوی نیز بی‌گمان نوعی نرم‌افزار واحد برای تحلیل و مدل‌سازی در اختیار داشته‌اند که گرچه چیستی و چگونگی آن امروز برای ما آشکار نیست، نمی‌توانیم آثار عینی آن را انکار کنیم. مطالعهٔ آثار مهندسی اصفهان صفوی نشان می‌دهد که علوم و مهندسی بین‌رشته‌ای[۲] یا توأم[۳] برای مهندسان ایرانی عصر صفوی مفهومی آشنا بوده است. اگر به طبیعت اصفهان چون نمایندهٔ یکی از اقلیمهای متنوع ایران نیک بنگریم، درمی‌یابیم که پیدایش و پیشرفت مهندسی توأم در ایران پیش از آنکه صرفاً بیانگر مرحله‌ای از پیشرفت علوم و فناوری و مهندسی در شاخه‌های گوناگون باشد، نمایانگر نیاز حیاتی‌ای ملموس است. به سخن دیگر، یگانه راه حل عملی برای بقای شهر حاشیهٔ کویری اصفهان در مقام پایتخت معتبر جهانی، بدل‌کردن موانع زیستی به منابع زیستی از راه مهندسی‌ای ظریف است. مهندسان سازندهٔ اصفهان صفوی با استادی این کار را انجام داده‌اند. آنان توانسته‌اند طبیعت ایستای کم‌ظرفیت و زمین شوره‌زار و طوفانهای کویری و آب فرّار را به منبعی لایزال برای محیط زیستی مناسب بدل کنند. از میان این همه، تنها اندکی تأمل در آخرین مورد، یعنی مهار آب، سطح و مرتبهٔ مهندسی به‌کاررفته در شکل‌گیری و توسعهٔ اصفهان صفوی را روشن می‌کند.

مهار آب بسیار دشوار است؛ زیرا هم از راههایی مانند تبخیر و نفوذ در زمین و جاری شدن به صورت سیل به‌سادگی از دست انسان می‌گریزد، و هم خیلی آسان به آبی نامطلوب بدل می‌شود. این دشواری به سبب کیفیت خاک اصفهان و دیگر خصوصیات طبیعی آن ملموس‌تر و شدیدتر می‌نماید؛ چندان‌که ناکامی در مهار آب و تبدیل آن به آب مطلوب فرصتی را از میان می‌برد و افزون بر آن، وضع را از آنچه هست نامطلوب‌تر می‌کند. با این همه، مهندسان صفوی به‌خوبی و با راه‌حلهایی متفاوت از آنچه امروزه عرفاً می‌شناسیم و به‌کار می‌بریم، از عهدهٔ این کار دشوار برآمدند.

(2) inter-disciplinary

(3) coupling



مهار هوا، به سخن دیگر جلوگیری از ورود بادهای نامطلوب و ایجاد جریانهای مطلوب، نیز آسان‌تر از مهار آب نیست.

این‌گونه مناسب‌سازیها مستلزم تعریف و ایجاد حاشیهٔ امن است. همان‌گونه که پیش‌تر گفتیم، پیوستگی‌ای بنیادین میان همهٔ مقیاسهای مهندسی در اصفهان وجود دارد. بی‌گمان این پیچیدگیها و ظرافتها در مکانیک سیالات و دینامیسم محیط شهر باید در مقیاسهای خردتر نیز دیده شود.

برای تحقق مهندسی تحلیلی سه دسته شناخت لازم است: شناخت طبیعت و امکانات و محدودیتهای آن، علم مدل‌سازی، شناخت انسان در جایگاه مرجع نیازها و تواناییها. این سه دسته شناخت عملاً همهٔ عاملهای موثر در کار مهندسی را، از ذره تا بی‌نهایت، شامل می‌شود. فرض مهندسی تحلیلی آن است که ذره و بی‌نهایت در حافظهٔ یکدیگر وجود دارند و از این جهت ذاتاً به یکدیگر شبیه‌اند. مطابق این فرض، لازم است که برای تحقق خواسته‌های انسان، حرکتی دوسویه و همواره میان ذره و بی‌نهایت وجود داشته باشد تا پیوستگی مطلوبی که مقوّم موجودیت اثر است، تحقق یابد. بنا بر این، برای طرّاحی کلان اصفهان لازم است هم‌زمان ملاط و آجر آن نیز طرّاحی شود. پس طرّاح شهر اگر تحلیلی اندیشیده باشد، باید هم‌زمان با توجه به کل شهر، متوجه عناصر خردی چون مولکولهای هوا و سلولهای موجودات زندهٔ آن نیز باشد. این توجه را در آثار تاریخی مهندسی اصفهان، از جمله در مهندسی پل خواجو، می‌توان دید.

ت ۹ (راست). پل خواجو، برش عرضی

ت ۱۰ (چپ). آثار پی پل خواجو که همچنین سدی برای تغذیهٔ جریان آب زیرزمینی اصفهان است

۶. بازخوانی مهندسی پل خواجو از راه بررسی مدلهای تحلیلی

گفتیم که بازخوانی هر اثر مهندسی هنگامی مطابق واقع است که هماهنگ با مرتبهٔ مهندسی مؤثر در ساخت آن باشد. در اینجا فرض ما بر آن است که پل خواجو اثر مهندسی تحلیلی است. اگر چنین باشد، باید بتوانیم هماهنگی‌ای ویژه میان پل و بستر طبیعی آن، یعنی شهر اصفهان، و اجزای خود پل بیابیم؛ به‌گونه‌ای که یکی از آنها بی دیگری بی‌معنا باشد. به‌سخن دیگر، شرط درستی فرض ما آن است که پل خواجو عضوی از مدیریت مهندسی اصفهان و خود نیز ماتریسی با گویایی مهندسی باشد.

شهر کویری اصفهان که رودخانه‌ای فصلی داشت، با مهندسی مادیها و پل خواجو صاحب رودی دائمی و «زاینده» شد که زاینده‌رود می‌خوانیمش. امروز آثار این اثر مهندسی عظیم هنوز برجاست: بندها و مادیهای مشروب‌کننده و حیات‌بخش شهر که در فاصلهٔ آتشگاه تا پل مارون ساخته شده است، آهنگ سه‌ماههٔ آب زاینده‌رود را به آهنگی سالیانه بدل می‌کند. شهر اصفهان بدین‌واسطه در طول سال همواره آب دارد. پی پل خواجو دیوارهٔ آب‌بند این جریان و کلید اصلی این سیستم است. جزئیات مهندسی پردهٔ آب‌بند یادشده بر ما روشن نیست، ولی شمعهای پیوستهٔ «درجا»یی که در پایین‌دست پل دیده می‌شود، اطمینان می‌دهد که چنین پرده‌ای وجود دارد (ت ۹). این بخش ناپیدا از پل سه نقش ساختاری مهم برای آن ایفا می‌کند: (۱) آب‌بندی کردن پی، (۲) جلوگیری از

اختلاف نشست و ترک‌خوردگی، (۳) افزایش مقاومت زمین. این پردهٔ آب‌بند، افزون بر سه نقش مهم یادشده، نقش هیدرولیکی برای جریان آب زیرزمینی زیر رودخانه و زیر سطح شهر نیز دارد.

۷. تعاریف و جایگاههای مهندسی پل خواجو با استفاده از نتایج تحلیلها

در مواجهه با پل خواجو، افزون بر ارزشهای صرفاً هنری و نمادین و ارزشهای مدنی شهری، با سه موضوع ناب مهندسی که در منظومهٔ مهندسی شهر تاریخی اصفهان نقش کلیدی دارد نیز مواجه می‌شویم: مدیریت مهندسی و مهندسی ارزش، مهندسی هیدرولیک، مهندسی سازه. این هر سه موضوع در پل خواجو جلوه‌هایی شگفت‌آور و ارزشمند یافته است. موضوع مدیریت مهندسیْ امکانات زیربنایی برای شهری شاه‌نشین را در کویر خشک فراهم می‌آورد؛ موضوع مهندسی هیدرولیکْ پایداری پل را در رودخانه ممکن می‌کند و بیشترین استعدادهای آب را به فعل در می‌آورد؛ و موضوع مهندسی سازه و معماری امکان تعامل انسان با آب و دیگر کارکردهای پل را تحقق می‌بخشد. مواجهه با سه موضوع یا سه محور مهندسی یادشده در اثر مهندسی دلیل روشنی است بر آنکه با سیستمی توأم با روابط بین‌شاخه‌ای و مرتبط با محیط روبه‌روییم. در ادامه، این سه موضوع مهندسی را در پل خواجو به‌اختصار بررسی می‌کنیم.

۷-۱. مدیریت مهندسی و مهندسی پیوستهٔ ارزش در حد کلان و خرد

طرح سیستم هیدرولوژیکی پل خواجو:

با نگاهی به هیدرولوژی ناحیهٔ اصفهان، می‌بینیم که در سطح و زیر سطح اصفهان، سیستم مدیریتی برای آب در کار است. پل خواجو، گرچه بخشی اندک از کالبد این سیستم را تشکیل می‌دهد، نقشی عمده در هیدرولوژی و ژئوهیدرولوژی آن دارد. به‌سخن دیگر، پل خواجو نقشی اصلی در کیفیت نسبت آب و زمین در این سیستم دارد. موقعیت پل، هم از جهت سازه‌ای و هم از جهت هیدرولیک، در هماهنگی کامل با وضع بستر طبیعیِ زمین و مقطع زمین‌شناسی آن است؛ به‌گونه‌ای که پیِ پلْ سدی زیرزمینی برای دریاچهٔ مخزن آب زیرزمینی شهر اصفهان نیز هست. پل خواجو سبب می‌شود که رودخانه در بالادست، آب مادیها را فراهم آورد و سفرهٔ آب زیرزمینی شهر را تقویت کند؛ و در پایین‌دست، چون زه‌کش زمینِ بسترِ شهر عمل کند. در نتیجه، ساخت پل خواجو بر زاینده‌رود دو نقش متفاوت ولی مکمل به نقشهای قبلی رودخانه برای شهر می‌افزاید.

طرح هیدرولوژیکی کلانِ حوزهٔ اصفهان و شهر اصفهان: سرچشمهٔ آب زاینده‌رود کوههای فریدن است که در ۱۵۰کیلومتری غرب اصفهان، در رشته‌کوههای زاگرس جای دارد. در این رشته کوه تقریباً پنج ماه در سال بارندگی هست. زاینده‌رود پیش از ساخت تونل کوهرنگ، رودی فصلی بود که در سه ماه از سال آب فراوان داشت. مهندسان دورهٔ صفوی با احداث تأسیسات تأخیرانداز و بندها و مادیهای بسیار و ایجاد پرده‌ای آب‌بند به وسیلهٔ پل خواجو، هم مسئلهٔ آب شهر را حل کردند و هم با شستشوی خاک و قابل کشت کردنش، دوام و گسترش آبادانی را در حاشیهٔ کویر میسر ساختند.

مهم‌ترین تهدیدهای طبیعی برای شهرهای ایران زلزله و سیل است. طبیعت ساکن اصفهان چنین تهدیدهایی برای شهر و شهروندان ایجاد نکرده است. سکون یادشده همچنین سبب شده بود که تا پیش از دورهٔ صفویان، ظرفیت زیستی این شهر محدود و بخش بزرگی از مزایای طبیعی آن بالقوه بماند. مهندسان عصر صفوی با واردکردنِ آب در زیر و روی سطح زمین به اصفهان، توانستند گرمی و خشکی هوا را، که دو مشکل اصلی مناطق کویری است، برطرف کنند و با استفاده از مزیت آرامش طبیعی آن، بر مشکل اصلی‌اش که همان طبیعت آرام و کم‌ظرفیت و آماده برای از دست دادن ظرفیتهای زیستی بود، غلبه کنند.

فضای سبز کناره‌های زاینده‌رود بر رطوبت هوای شهر می‌افزاید و آن را لطیف می‌کند و همراه با شبکهٔ مادیها، که گفتیم در اصلاح خاک اهمیت فراوان دارد، سبب می‌شود که همواره جریان عمودی آب در خاک وجود داشته باشد. بدین ترتیب، مهندسان صفوی به‌کمک رودخانه و فضای سبزی که به‌واسطهٔ وجود مادیها ممکن شد، توانستند سه بخش محیط زیست، یعنی جوّ و سطح زمین و زیر سطح زمین، را مهار و حفاظت کنند. مجموعهٔ فضای سبز و مادیها مانند اجزای دستگاه تنفس،

هوای مطلوب شهر را تأمین می‌کنند. به همین سبب، این مجموعه از آتشگاه در غرب شهر آغاز می‌شود؛ جایی که شکل طبیعی آن مناسب پذیرفتن نقش دهان برای این دستگاه تنفس عظیم شهری است.

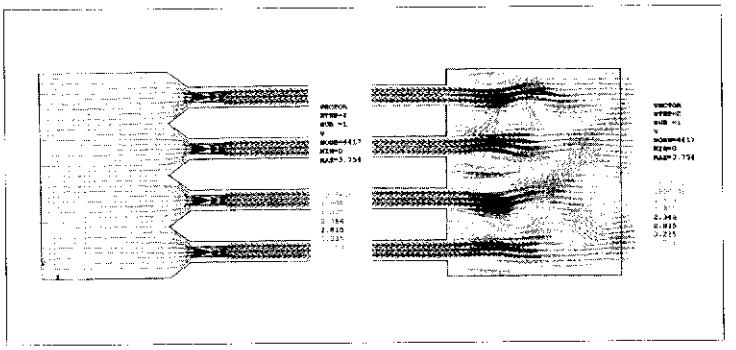
۷-۲. مهندسی هیدرولیک

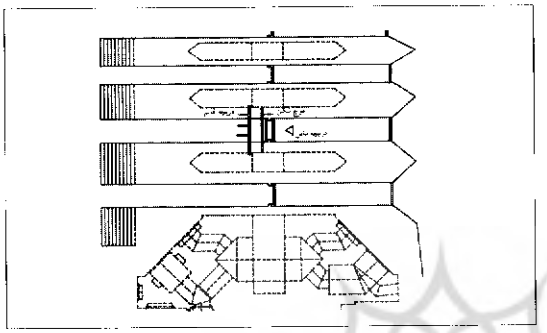
گفتیم که مهندسی بر اساس علوم پایه و اندازه‌گیری و تجربه و فناوری تحقق می‌پذیرد. اساس مهندسی هیدرولیک علوم پایهٔ مکانیک و دینامیک سیالات و رفتار مصالح است. جریان آب در پل خواجو برخلاف پلهای دیگر، از جمله سی‌وسه پل، دینامیک و متلاطم و غیرخطی است. به سخن دیگر، جریان آب در پل خواجو یک‌بعدی و در جهت رودخانه نیست. طرّاحی هیدرولیک پل خواجو بر اساس جریانهای عرضی متقاطع و تولید جریان برگشت در پایین‌دست پل است، که افزون بر استهلاک انرژی آب، محیط و منظره‌ای هیجان‌انگیز برای شهر ایجاد می‌کند.

یکی از مهم‌ترین ویژگیهای مهندسی هیدرولیک پل خواجو، که ارتباطی مستقیم با مفهوم مهندسی تحلیلی دارد، توأم بودن کارکردهای گوناگون اجزای کالبدی آن است. مثلاً می‌توان از ارتباط ظریف و پیچیدهٔ هندسهٔ معماری بنا و کارکرد عناصر سازه‌ای با کارکرد هیدرولیکی آن یاد کرد. در پل خواجو، همهٔ اجزای معماری، هم از نظر سازه‌ای و هم از نظر هیدرولیک، عناصری معنادار و فعال‌اند که تغییر در جهت کاهش یا افزایش هر یک از آنها به ناقص‌شدن و در نهایت به تخریب پل می‌انجامد.

از نظر کالبدی، مهندسی هیدرولیک پل از ۲۱ کانال اصلی تشکیل شده است که هریک هفت دریچه در دو سطح دارد (ت ۳ و ۹). در این سیستم، ظرایف بسیاری در سازه و نقش دریچه‌ها، زاویه و اندازهٔ کانالها، ارتفاع ورودیها و سکوهای متفاوت در خروجی کانالها، و ماهیت و صورت حوضچهٔ آرامش پایین‌دست و شیوهٔ استهلاک نیروی مخرب آب در داخل پل و پایین‌دست، و حوضچه‌های پرورش ماهی در نظامی میان‌دانشی دیده می‌شود، که شرح نوآوریهای موجود در هر یک نیازمند مقاله‌ای مستقل است.

پل خواجو بنایی است که طرح معماری آن برای برآوردن مقاصد مهندسی به وجود آمده است و از این نظر شاید بی‌مانند باشد. حوضچهٔ آرامش





ت ۱۱ (بالا). پل خواجو، نتیجهٔ مدل‌سازی جریان آب در کانالهای آب

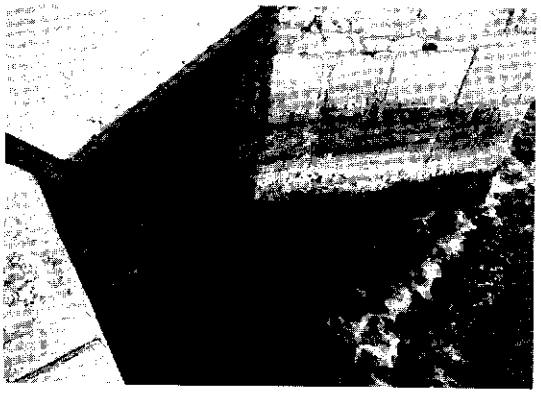
ت ۱۲ (پایین). بخشی از نقشهٔ پل در تراز کانالهای سنگی. مکان دریچه‌های مایل و موج‌شکنها روی نقشه مشخص شده است.

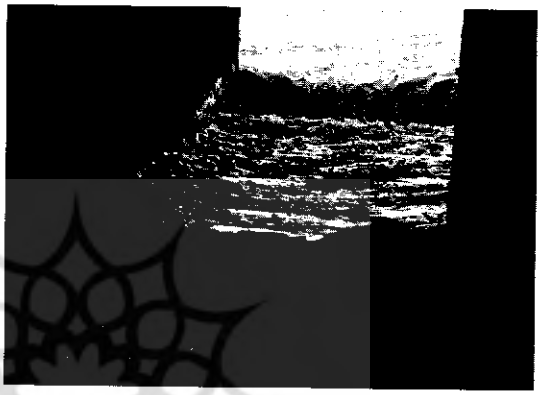
ویژهٔ پل و طرّاحی ویژهٔ سطوح و کف و محورهای کانالها همگی کمک می‌کنند تا سرعت جریان آب در گذر از بالادست پل به پایین‌دست آن مرتباً تغییر کند و مقصود طرّاح در استهلاک انرژی آب از طریق اصطکاک برآورده شود.

مدل‌سازی بخشی از پل با «روش اجزای محدود»[۴] تأیید می‌کند که نسبت عمیق و پیچیده‌ای میان طرّاحی معماری و مهندسی هیدرولیک پل وجود دارد (ت ۱۱ و ۲۱ و ۲۲).

(4) Finite Element Method

مهندسی هیدرولیک پل خواجو از چند بخش تشکیل شده است. بخشی از آن که کمتر دیده و کمتر از آن سخن گفته‌اند، همان پردهٔ آب‌بند زیرزمینی است. چنان‌که گفتیم، این پرده نقش کلانِ شهری دارد و از نظر کالبدی همان پی پل است. بخش دومْ پایه‌های سنگی پل است که از کانالهای انتقال آب با سیستم کنترل دریچه‌ای در میان بنا در دو سطح با اختلاف ارتفاع ۴ متر تشکیل شده است. دریچه‌های زیرین با کف طبیعی رودخانه هم‌ترازند و چون به شکل مایل طرّاحی شده‌اند، می‌توانند آب را در صورت لزوم به سوی دریچه‌های بالایی هدایت کنند. پل خواجو به کمک این سیستم به سدی تنظیمی برای زاینده‌رود بدل شده است که می‌تواند ارتفاع آب بالادست را تا حداکثر ۴ متر بالا ببرد.





ت ۱۳ (بالا، راست). پل خواجو، ورودی آب به کانالها، دید از بیرون

ت ۱۴ (پایین، راست). پل خواجو، ورودی آب به کانالها، دید از درون کانال. افتادگی آب در لحظه ورود به کانال، که ورود را به عمل بلع شبیه می‌کند، در تصویر مشخص است. چگونگی برخورد آب با برآمدگی مایل درون کانال نیز دیده می‌شود.

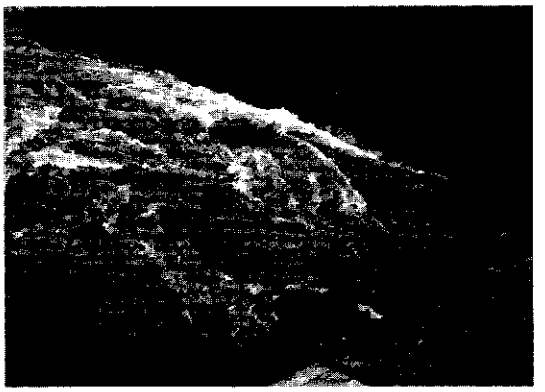
ت ۱۵ (چپ). پل خواجو، برآمدگی سنگی مایل که محل قرارگیری دریچه‌ها برای بالاآوردن آب تا بلندی‌ای در حدود ۲ متر است

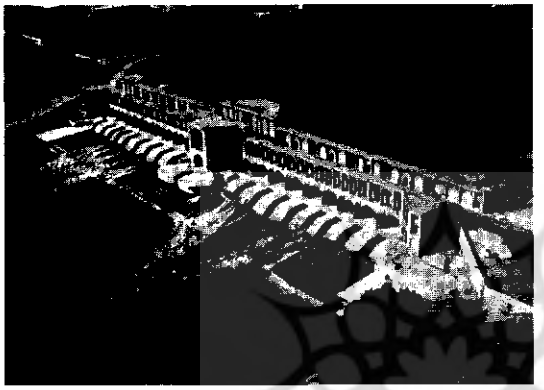
یکی از نوآوریهای مهم ولی تکرارنشدهٔ مهندسی هیدرولیک پل خواجو شیوهٔ تنظیم سرعت و جهت حرکت آب از بالادست تا پایین‌دست آن است. برای توضیح بهتر این نوآوری، باید رفتار متقابل آب و بنا را در این چهار مرحله توضیح دهیم: مرحلهٔ ورود آب از بالادست، مرحلهٔ ورود آب به درون بنا، مرحلهٔ انتقال آب درون بنا، مرحلهٔ خروج (ت ۱۱ و ۱۲).

شیب طولی کف سنگی و زاویهٔ تند پایه‌های پل در مرحلهٔ ورود آبْ هندسه‌ای ایجاد می‌کند که آب را با کمترین تنش و تلاطم وارد بنا می‌کند؛ گویی بنا آب را می‌بلعد. اختلاف ارتفاع حدوداً ۴۰سانتی‌متری‌ای که بلافاصله پس از ورود آب در کف پل ایجاد کرده‌اند و بدان وسیله آب به درون کانال پل می‌ریزد، تشبیه ورود آب به گلو و عمل بلعیدن را تقویت می‌کند (ت ۱۳ و ۱۴).

در مرحلهٔ دوم، آب وارد کانالهایی به عرض ۱۸۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲۰ سانتی‌متر می‌شود. برآمدگی سنگی مایلی که در این کانالها تعبیه شده و سه سوی مقطع عرضی کانال را در بر گرفته یکی از شاهکارهای مهندسی پل خواجوست (ت ۱۵). این برآمدگی، که در ظاهر به حلقه‌ای Uشکل می‌ماند، دو نقش کاملاً متفاوت دارد: هم تکیه‌گاه دریچه‌های متحرک مایلی است که گفتیم آب را تا چهار متر بالا می‌برند؛ هم محافظی است برای بدنهٔ سنگی کانال در برابر نیروی فرساینده و ویرانگر آب. نقش نخست عادی است؛ ولی نوآوری مهندسی هیدرولیک پل در نقش اخیر بسیار چشم‌گیر است. برآمدگی یادشده لایه‌ای از آب ساکن در دو پهلو و کف کانال ایجاد می‌کند که هم مانع فرسایش بدنهٔ سنگی پل می‌شود و هم پوششی کم‌اصطکاک برای آب جاری رودخانه فراهم می‌کند. به سخن دیگر، آب جاری رودخانه به‌کمک این برآمدگی، درون لایه‌ای از آب ساکن در پل می‌لغزد (ت ۱۴). این برآمدگی در ماندگاری و پابرجایی پل خواجو، و بدان واسطه در پابرجایی محیط زیست مطلوب در اصفهان، نقشی حیاتی دارد.

در مرحلهٔ سوم، پس از برآمدگی یادشده، جریان آبی که تلاطم طبیعی رودخانه را داشت به‌کمک هندسه و مصالح مناسب به جریانی بسیار آرام بدل می‌شود که درون لایهٔ ساکن آب می‌لغزد. جالب‌ترین دستاورد





ت ۱۶ (راست). پل خواجو، خروجی یکی از دو کانال جانبی واقع در زیر عمارت بیگلربیگی. عکس از رابرت بایرن (۱۹۰۵–۱۹۴۱) ح ۱۹۳۳–۱۹۳۴، مأخذ تصویر: Courtauld Institute of Art, A47/1628

ت ۱۷ (بالا، چپ). پل خواجو، بخش پایین‌دست ، جریان آب متقاطع در پایین‌دست یکی از جاذبه‌های شهری این اثر مهندسی است

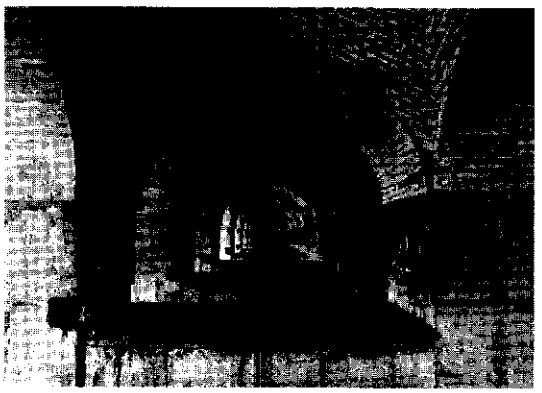
ت ۱۸ (پایین، چپ) پل خواجو، منظره هوایی غای غربی پل. حوضچه آرامش بی‌مانند پل در تصویر دیده می‌شود، مأخذ تصویر: *Islamic Art and Architecture, from Isfahan to the Taj Mahal*, p. 152

مهندسی هیدرولیک پل خواجو در مرحلهٔ پایانی آن است. مهم‌ترین مسئله در طرّاحی پایین‌دست پلهای رودخانه، آرام‌کردن آب برای پیش‌گیری از تخریب کف و بدنهٔ پل است. طرّاح پل خواجو با ایجاد تلاطم و تقاطع حساب‌شده در جریان آب، توانسته است حوضچهٔ آرامش بی‌مانندی ایجاد کند که در آن، نیروی ویرانگر آب با خودِ آب مستهلک می‌شود. این حوضچه با اختلاف ارتفاع سکوهای خروجی و زوایای متفاوت آب خروجی در کانالهای جانبی ایجاد شده است. این اختلافها نظم جریان موازی آب را در کانالهای میانی بر هم می‌زند. در این حوضچه، انرژی ویرانگر آب به صورت انرژی حرارتی آزاد می‌شود. افزون بر آن، برخورد جریانهای متقاطع آب حبابهای بسیاری تولید می‌کند که در مثلثیهای ساکنی در میان جریانهای موازی آب جمع می‌شود. (ت ۱۶ و ۱۷ و ۱۸). این حبابها اکسیژن آب را افزایش می‌دهد و آن را برای زیست و پرورش آب‌زیانی چون ماهی مناسب می‌کند.

مهندسان دورهٔ صفوی از این طریق در پایین‌دست پل حوضچه‌هایی برای پرورش ماهی پدید آورده‌اند و بر اثر آن، با ایجاد امکان صید ماهی، بر غنای تفرجگاه پل خواجو افزوده‌اند. اصفهانیهای میان‌سالْ صید ماهی در پل خواجو را در سالهایی که آب زاینده‌رود تمیزتر بود خوب به خاطر دارند. فرسایش کف پایین‌دست پل خواجو با این طرّاحی ویژه بسیار کمتر از دیگر پل پرآوازهٔ اصفهان، سی‌وسه‌پل، است؛ گرچه دریچه‌های خروجی آن کوچک‌تر و به‌همان نسبت سرعت خروج آب در آن بیشتر است. می‌بینیم که طرّاحی هوشمندانهٔ پل خواجو توانسته است نقطهٔ ضعف طبیعی پلهای درون رودخانه را به نقطهٔ قوت هیدرولیکی و سازه‌ای و شهری آن بدل کند.

۷–۳. مهندسی سازه و ژئوتکنیک

در مهندسی سازه و ژئوتکنیک، علوم پایه و زیربنا عبارت است از مکانیک جامدات و آنالیزهای پایداری و تغییرشکل‌پذیری. به‌کمک این علوم پایه و شناخت خواص مواد و مصالح، سازه با اندرکنش زمین و بارهای مختلف و کیفیت توزیع تنشها و تغییرشکلها هماهنگ می‌شود. بنا بر این، مسئلهٔ اصلی مهندسی



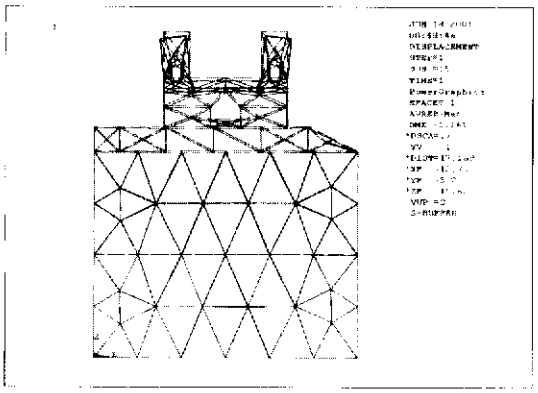
ت ۱۹ (بالا، راست). پل خواجو، دالان میانی پل. محل نصب دریچه‌های فوقانی در پایهٔ سمت چپ تصویر و محل نصب دریچه‌های موج‌شکن در میانهٔ سکو دیده می‌شود.

ت ۲۰ (پایین، راست). پل خواجو، مقطع عرضی پل از سه بخش تشکیل شده است: ۱) پی که پایین‌ترین بخش پل است و سطح فوقانی آن دیده می‌شود، ۲) کانالهای سنگی که بخش میانی پل را تشکیل می‌دهد، ۳) بخش دو طبقه فوقانی که از جنس آجر است و بالاترین بخش پل را تشکیل می‌دهد.

ت ۲۱ (چپ). نتیجهٔ مدل‌سازی ساختاری پل در مقطع عرضی. تصویر نشان می‌دهد که تغییر شکلهای عمودی پل کاملاً موازی با محور افق است.

سازه تضمین پایداری و ماندگاری بنا و تنظیم تغییر شکل و تغییرشکل‌پذیری آن است. این مسئلهٔ کلی در اثری مانند پل خواجو به صورتِ لزوم نگهداری آب و پیش‌گیری از تخریب پل با توجه بَه بارهای هیدرولیکی و ساختمانی و خصوصیات زمین رخ می‌نماید. در نتیجه در این پل از نظر مهندسی سازه و ارتباط سازه و عملکرد، موضوعهای تفکیک و ترکیب مراحل رفتار هیدرولیکی رودخانه و سازه، انتخاب محل احداث پل، و نوع و ترکیب و بافت مصالح و صورت‌بندی هندسی بنا قابل بررسی است. در پل خواجو ابداعهای سازه‌ای، از کیفیت انتخاب مصالح گرفته تا چیدمانها و بافتها و ترکیبهای هندسی موجود در درون و برون سازه، فراوان است. در اینجا تنها به بخشی از آنها می‌پردازیم.

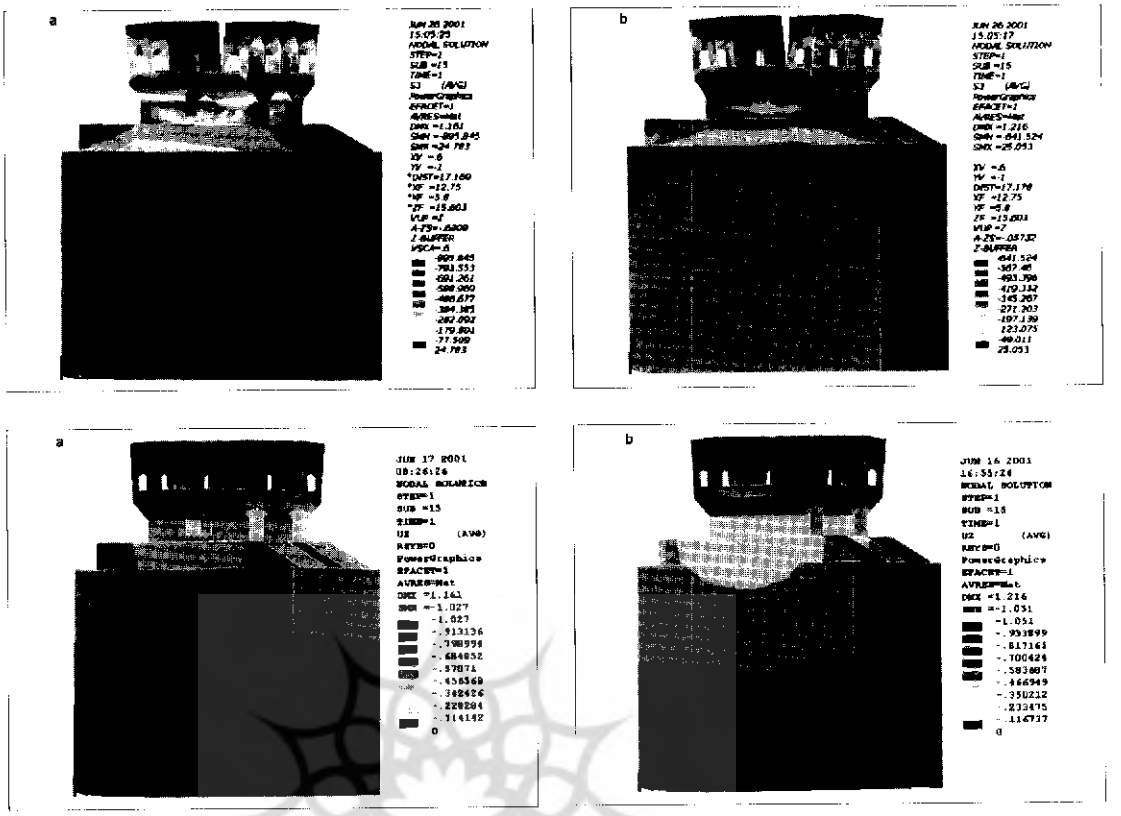
نخستین خلاقیت برجسته در طرّاحی پل خواجو از منظر مهندسی سازه نیز در نکته‌ای است که بارها گفتیم: پل را در جایی ساخته‌اند که افزون بر داشتن زمین مناسب، موقعیتی مناسب نیز برای ایجاد مخزن زیرزمینی آب اصفهان است.



برشهای عمودی و افقی پایه‌های پل، که هر دو به قایق می‌ماند، نشان می‌دهد که طرّاحان پایه‌ها اصول علم آئرودینامیک را به‌خوبی می‌شناخته‌اند (ت۱۲). کانالها و دریچه‌های پل را چنان طرّاحی کرده‌اند که بارهای برشی و ضربه‌ای روی پیکر آن به کمترین میزان برسد. از این‌رو، کف پل خواجو، بر خلاف پلهای دیگر، به‌معنای دقیق واژه «طرّاحی» شده است. این طرّاحی که گذشت زمان کارآیی آن را ثابت کرده است، نشان می‌دهد که مهندسان صفوی دانش و تصوری صحیح از شیوهٔ تنظیم رفتار متقابل آب و سازه و مصالح و هندسه داشته‌اند.

بررسی مصالح ساختمانی در برش عمودی پل نشان می‌دهد که این مصالح در نهایت دقت و متناسب با کارکردهای توأم سازه‌ای و هیدرولیکی و معماری‌شان انتخاب شده و به‌کار رفته است: پی پل با شمعهایی با جدار سفالی و هستهٔ سنگ و ساروج، که حجمی پیوسته و مقاوم می‌سازد؛ بخش میانی از سنگ و ملاط آهک که در محیطهای مرطوب مقاومت خوبی دارد؛ و بخش فوقانی از آجر با ملاط گچ و خاک ساخته شده است (ت ۹ و ۲۰). تنوع مصالح پل مستلزم طرّاحی اتصالاتی است که بتواند ترکیبی واحد از تنوع عناصر ساختاری و کاربردی ایجاد کند. بار دیگر، گذشت زمان نشان می‌دهد که ابداعها و ابتکارهای مهندسان عصر صفوی کارآمد بوده است.

شاید بتوان گفت که مهم‌ترین دستاورد پل از منظر مهندسی سازه ابتکارهای مبتنی بر هندسه و بافت اجزای سازه‌ای است. قطعه‌هایی که تحت فشار و سایش است (مانند جدارهای سنگی پایه‌ها)، قطعه‌های فشاری (مانند پایه‌های آجری)، و قطعه‌های بسیار ظریف تحت نیروهای خمشی (مانند پاسنگهای کم‌نظیر که باید نیروی خمشی



ت ۲۲. نتایج مدل‌سازی پل برای مقایسهٔ چگونگی توزیع تنش و تغییر شکل پل در حالتی که دالان میانی وجود داشته باشد (مطابق وضع کنونی) و حالتی که دالان میانی وجود نداشته باشد. مدل‌سازی نشان می‌دهد که نقش دالان میانی هم در چگونگی توزیع تنش (تصویرهای بالا چپ و راست) و هم در توزیع تغییرشکل (تصویرهای پایین چپ و راست) مثبت است.

دهانه‌های ۲متری تحت بار زنده و فشار آب سرریز را تحمل کند) اجزای مهم پل به‌شمار می‌آیند. از این منظر، پیوستگی و نرمی و ماندگاری، و پیش‌گیری از خستگی اجزای سازه‌ای (با توجه به رفتار ملاطها و هندسهٔ اجزای بنا) و اختلاف نشست و فرسایش ناشی از هوازدگی ویژگیهایی است که با هندسهٔ مندرج در صورت بنا و خصوصاً پایهٔ پل، جا و اندازه و ارتفاع متنوع دریچه‌ها، و مصالح مناسب برای قسمتهای گوناگون بنا تأمین شده است. این دستاورد مهم در طرّاحی دالان محوری پل در سطح میانی آن به‌خوبی دیده می‌شود (ت ۱۹). در مدل‌سازی عددی‌ای که نگارنده با نرم‌افزار انسیس[5] انجام داده، معلوم شده است که گالری میانی پل در طبقهٔ تحتانی از نشست غیریکنواخت پل پیش‌گیری می‌کند. اما مهم‌تر از آن، روشن شده که هندسهٔ پل، هم کمترین نشست را دارد و هم رفتار یکنواخت و بدون خمش سازه‌ای ایجاد می‌کند ــ طرّاحی با کیفیتی که بیشتر به معجزه می‌ماند (ت ۲۱ و ۲۲).

۸. نتیجه

در این نوشته کوشیدیم مقدمه‌ای برای بازخوانی مهندسی اثر تاریخی بنامی از شهر اصفهان، تا اندازه‌ای که برای مخاطبان اهل تاریخ هنر جالب باشد و تا جایی که اطلاعات کنونی ما اجازه می‌دهد، فراهم آوریم.

دانش امروز ما از علم و فناوری و مهندسی دوره‌های تاریخی گذشته، حتی از دوره‌ای خوش‌اقبال چون دورهٔ صفویه که ساهاست در کانون توجه اهل تاریخ هنر جای دارد، بسیار اندک و همراه با خطاست ــ خطایی که غالباً به‌صورت دست‌کم گرفتن توان آن دوره یا اغراق در تواناییهای دورهٔ کنونی رخ می‌نماید. بنا بر این، موضوع این نوشته برای آنکه از منظر علم تاریخ «اثبات‌شده» یا «داشتهٔ علمی» تلقی شود، هنوز نیازمند کار و پژوهش فراوان است. با این همه، به‌نظر می‌رسد که دلایل و نشانه‌های کافی در اختیار داریم تا مسائلی را که از این دیدگاه در برابرمان قرار می‌گیرد مسائل مشترک علم تاریخ هنر و مهندسی بدانیم و بدانیم که مکتب و مهندسی و معرفت در صورتی واقعی و غیرعاریتی است که از درون برآید نه از بیرون.

(5) ANSYS

این نوشته برای مهندسی بیانگر «اعتقاد» است: اعتقاد به مرتبه‌ای که مهندسی باید عزم جستن دوبارهٔ آن را داشته باشد. از این دیدگاه آثار بزرگ مهندسی امروز با آثار بزرگ گذشته تفاوتی ندارد جز آنکه تاریخ مهر تأیید بر آثار گذشتگان زده است. این آثار تاریخی، که پل خواجو نمونه‌ای برجامانده از آنهاست، هریک درسی برای دانشجویان و استادان مهندسی به‌شمار می‌آید. این عزم باید در میان مهندسان کشور ما راسخ‌تر باشد، چرا که هم دردمندتریم و هم غنی‌تر: دردمندتریم، زیرا وضع مهندسی در کشور ما وخیم‌تر است؛ و غنی‌تریم، زیرا آثار برجستهٔ بزرگ و کوچک مهندسی در کشور ما فراوان است. چنانچه این دردمندی و غنا به‌درستی با یکدیگر بیامیزند، ما نیز خواهیم توانست مانند مهندسان متقدم کشورمان، ضعفهای خود را به قوت بدل کنیم. شاید نیاز کشور ما به سازندگی و فرهنگ و طبیعت متنوع آن دست‌مایه‌ای برای آغاز این تلاش شود.

همچنین این نوشتار بیانگر «دیدگاه» است: دیدگاهی برای مورخان هنر و معماری. به‌کار گرفتن روشهای مهندسی تحلیلی از آن گونه که در این مقاله گفتیم، می‌تواند دیدگاه و روشی برای طرح پرسش و یافتن پاسخ برای همهٔ پژوهشگران تاریخ هنر و معماری کشورمان باشد. این دیدگاه برای تاریخ هنر و معماری هنوز تازه است و امکاناتش هنوز ناشناخته. با این همه، از هم‌اکنون پیداست که می‌تواند نقشی مؤثر در تصحیح روش تحقیق در تاریخ هنر و معماری و آزمودن یافته‌های موجود داشته باشد. این نوشتار اگر توانسته باشد امکان و فواید این دیدگاه را تشریح کند، می‌تواند از این جهت مقدمه‌ای همراه با مصداق به‌شمار آید.

نویسنده امید دارد که تاریخ هنر و معماری و مبانی و روشهای مهندسی به موضوعها و مفهومهای قابل‌قیاس و مشابهی برسند تا مگر بدین‌وسیله بتوانند یکدیگر را یاری کنند و این تلاش را گامی برای تحقق این آرزو می‌بینند.

اما سرانجام، اعتقاد و دیدگاهی که یاد کردیم مسئولیتی برای امروزمان معین می‌کند: در مواجهه با آثار تاریخی‌ای چون پل خواجو، و اجزا و اضعاف آن مؤدبانه و محترمانه رفتار کنیم، تا بتوانیم از آنها بیاموزیم و بگذاریم نسلهای آینده نیز از آنها بیاموزند. این مسئولیت بر دوش متولیان امور اجرایی بیشتر سنگینی می‌کند؛ زیرا کاستن از آثار مهندسی تحلیلی یا افزودن به آنها اگر بر پایهٔ شناخت دقیق کل سیستم نباشد، ناگزیر به صدمه دیدنِ آثار و سرانجام به تخریب آنها می‌انجامد.□

کتاب‌نامه

حسن‌دوست، محمد. *فرهنگ ریشه‌شناختی زبان فارسی* (ج ۱)، زیر نظر بهمن سرکاراتی. تهران، فرهنگستان زبان و ادب فارسی، ۱۳۸۳.

مجموعهٔ آثار معماری سنتی ایران، دوران اسلامی. تهران، سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح.

مهریار، محمد و دیگران. اسناد تصویری شهرهای ایرانی: دورهٔ قاجاریه. تهران، سازمان میراث فرهنگی کشور و دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۷۸.

Restoration of the Ali Qapu, Chehel Sutun, and Hasht Behesht, Isfahan, Iran, Major Restoration Completed 1977.

Stierlin, Henri. *Islamic Art and Architecture, From Isfahan to Taj Mahal*, London, Thames and Hudson, 2002.

پی‌نوشتها

۱. دکترای Modeling، عضو هیئت علمی دانشکدهٔ عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲. مهندسی به این معنا معادل واژهٔ انگلیسی engineering است؛ نک:

The American Heritage Dictionary of the English Language, 3rd ed., 1998.

۳. نک: «اندازه»، در: فرهنگ ریشه‌شناختی زبان فارسی.