



محاسبه‌ی ترسیمی

قوس بنایی

پویا خزائی . بهناز مترجم



پژوهشکده معماری خاک اصفهک
ESFAHK MUD CENTER

محاسبه‌ی ترسیمی

قوس بنّایی

پویا خزائلی
بهناز مترجم

انتشارات تخصصی هنر،
معماری و شهرسازی

کتابخانه کسری

خزائلی پارسا، پویا، ۱۳۵۳ -
محاسبه‌ی ترسیمی قوس بنایی / پویا خزائلی، بهناز مترجم.
مشهد: کتابکده کسری، ۱۴۰۱.
۲۵۷ ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۶۹۶۳-۵۳-۴

وضعیت فهرست نویسی: فیا

یادداشت: کتابنامه: ص.ع. به انگلیسی: Pouya Khazaeli, Behnaz Motarjem. Graphical analysis of the masonry arch.

یادداشت: کتابنامه: ص. ۲۵۵ - ۲۵۷.

موضوع: طاق‌ها -- طرح و نقشه Arches -- Design and plans

شناسه افزودن: مترجم، بهناز، ۱۳۶۳-

رده‌بندی کنگره: NA۲۸۸۰

رده‌بندی دیویی: ۷۲۱/۴۱

شماره کتابشناسی ملی: ۹۱۳۵۳۱۹

محاسبه‌ی ترسیمی قوس بنایی

پویا خزائلی و بهناز مترجم

متن: پویا خزائلی

تصویر: بهناز مترجم

چاپ اول: بهار ۱۴۰۲

شمارگان: ۵۰۰

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۶۹۶۳-۵۳-۴



انتشارات: کتابکده کسری

نشانی: مشهد فلسطین ۱۴ پلاک ۱۰ تلفن: ۰۵۱ ۳۷۶۷۰۰۱۹

وبسایت و فروشگاه اینترنتی: www.kasrapublishing.ir

کلیه حقوق چاپ و نشر این کتاب برای انتشارات کتابکده کسری محفوظ است. هرگونه تصویربرداری و تکثیر اعم از نسخه کاغذی و دیجیتال و... از تمام یا بخشی از کتاب ممنوع و موجب پیگرد قانونی است.

فهرست

مقدمه	۷
شیوه‌ی ترسیم قوس‌ها	۱۷
تحلیل سازه	۶۹
روش تسییحی	۱۰۷
بهینه‌سازی چفدها	۱۲۱
ترسیمات خط نیرو در چفدها با ضخامت ثابت	
ترسیمات بهینه‌سازی	
نکات مهم	۲۳۱
منابع	۲۵۳

نگارش این کتاب بدون همراهی عزیزانی که به صورت مستقیم و غیرمستقیم ما را در این مسیریاری کردند امکان پذیر نبود:

فاطمه امیدی، امیرمسعود احمدی، آرزو عالی نژاد، حسین باقری، محسن مهدی زاده، بردیا حاجی رسولی ها، صبا قاسمی زاده، نینا علوی، بهمن مترجم و ستیرم مایتی.

مقدمه

در آغاز، تصویر دقیقی از نقشه‌ی راه نداشتم و فکر نمی‌کردم که این حجم از کار پیش روی احیای معماری خشتی باشد. با وجود سابقه‌ی تاریخی عظیم ایران در معماری با خشت و حجم دانش شفاهی در این وادی، شناخت اندک ما از این معماری سبب شده تا امروز گسستی عظیم با فرهنگ ساخت تاریخی خود داشته باشیم. گسست به این معنی که پایه‌ای برای بنا نهادن ساختاری معاصر و تداوم بخشیدن به این معماری هزاران ساله نساخته‌ایم و لاجرم دنیایی را بی بهره از این دانش رها کرده‌ایم. افسوس که به همین دلیل نیز از ارتباط با محیط طبیعی و جغرافیایی خود بازمانده‌ایم.

با همه‌ی این احوال، اکنون مسیر شفاف‌تری پیش رو داریم و حداقل می‌توان گفت که نقشه‌ی راه برای احیای این معماری کم‌وبیش مشخص است. هرچند محقق شدن این هدف کار زیادی می‌طلبد و جز با کمک و همراهی شما عزیزان امکان پذیر نخواهد بود.

در این کتاب فرصت یاد کردن از اهمیت معماری خشتی به عنوان پاسخی برای مسائل روز دنیا که با آن‌ها دست به گریبانیم نیست و هدف این مجموعه به طور مستقیم، ارائه‌ی روش‌های کاربردی برای تحلیل و محاسبه‌ی طاق‌ها است. در کتابی که پیش از این به نام «اجرای طاق‌های خشتی»^۱ منتشر شد، صفحاتی را به بررسی جایگاه و اهمیت شناخت معماری و طاق‌های خشتی اختصاص دادیم و کتاب پیش‌رو فصل دیگری در تکمیل این دانش است. هرچند در این مجموعه فرض بر استفاده از خشت برای شکل دادن طاق‌ها است، اما شیوه‌ی تحلیل و محاسبه‌ی ارائه شده در این کتاب می‌تواند برای تمامی طاق‌ها که با مصالح بتّایی متفاوت ساخته می‌شوند به کار رود. با روش محاسباتی پیش‌رو می‌توان طاق‌های خشتی، سنگی، آجری و یا طاق‌های شکل‌گرفته از مصالح بتّایی ناهمگون را تحلیل و محاسبه کرد. چرا که منطقی مشترک، توضیح‌دهنده‌ی رفتار سازه‌ای تمامی ساختارهای شکل‌گرفته با مصالح بتّایی است.^۲

تاریخچه‌ی مختصر و درآمدی بر روش‌ها:

سال‌های ۹۲-۱۳۹۱ یعنی حدود ده سال قبل از نگارش این کتاب بود که با «ستپریم مایینی»^۳ برای شروع کار در «موسسه‌ی معماری خاک آروویل»^۴ در تماس بودم. آن زمان ستپریم پیشنهاد جذابی را برای یک همکاری تحقیقاتی مطرح کرد، پیشنهاد محاسبه و تحلیل طاق‌های ایرانی. هرچند این تحقیق با تأخیری هشت ساله شروع شد، اما خوشحالم که سرانجام نتیجه‌ی آن در قالب این کتاب در اختیار شما عزیزان قرار دارد.

۱- «اجرای طاق‌های خشتی»، تألیف: پویا خزائلی و بهناز مترجم، انتشارات: کتابکده کسری

۲- سازه‌های شکل‌گرفته از مصالح بتّایی

۳- Satprem Maini

۴- Auroville Earth Institute

شاید در بدو گرفتن این پیشنهاد به طور کامل بر اهمیت موضوع واقف نبودم و به همین علت نیز با دریافت پیشنهاد تحقیقاتی-اجرایی دیگری به ایتالیا نقل مکان کردم. طبیعتاً فقط با آگاهی از اهمیت موضوع بود که می‌توانستم از کار با شرایطی بهتر چشم‌پوشی کنم.

در راستای مطالعات دوسال اخیر، روش‌های «زنجیری»^۵ و «تسبیحی»^۶ یا همان شیوهی «فونیکولر»^۷ را برای تحلیل طاق‌های ایرانی استفاده کردم و به مقایسه‌ی آن‌ها پرداختم.

روش محاسباتی برپایه‌ی استفاده از «زنجیر آویخته»^۸ تصحیحات زیادی نیاز دارد، به ویژه اگر ضخامت طاق متغییر باشد. در حقیقت این روش پیش از هر چیزی می‌تواند برای تحلیل طاق‌هایی که در طول خود ضخامت ثابتی دارند به کار رود. همان‌طور که در کتاب «اجرای طاق‌های خشتی» هم اشاره شد، به جز مواردی معاصر، هیچ‌گاه از هندسه‌ای که کاملاً برهنده‌ی «زنجیر آویخته» منطبق باشد برای شکل دادن به طاق‌ها استفاده نشده که علت آن نیز پیچیدگی اجرای چنین هندسه‌ای در بتایی است. در عوض در تاریخ معماری ایران و جهان، کوشش بر تعریف هندسه‌ای ساده و کاربردی برای طاق‌ها بوده تا بتواند علاوه بر شکل دادن به ساختارهایی مقاوم به راحتی قابل اجرا باشد. این رویکرد تاریخی همان رویکرد مورد توجه در این کتاب است. در این رویکرد با تنوع گسترده‌ای از هندسه‌ی طاق‌ها روبه‌رو خواهیم شد که در تمام آن‌ها مسئله‌ای مشترک وجود دارد: «چگونه با کمترین میزان استفاده

۵- Catenary

۶- عبارت «روش تسبیحی» در این کتاب معادل «متد فونیکولر» استفاده شده است. این عبارت اولین جایگزین پیشنهادی برای «متد فونیکولر» در زبان فارسی است.

۷- Funicular

۸- Hanging chain method

از مصالح که خود به معنای صرفه جویی در انرژی است، با هندسه‌ای ساده، یک قوس بتائی را اجرا می‌کنیم؟». از نظر نگارنده آن چه باعث تنوع این قوس‌ها است، نه امری سلیقه‌ای بلکه امری کاربردی است. به این معنی که از یک طرف مطابق با فضای مورد نیاز، هندسه‌ای متفاوت برای یک قوس استفاده می‌شود و از طرف دیگر قوس‌ها در مسیر تکاملی خود برای پاسخگویی بهتر به مسئله‌ی اصلی خود یعنی «استفاده‌ی حداقل از مصالح»، هندسه‌ای متفاوت پیدا می‌کنند. درحقیقت دو عامل اصلی تنوع قوس‌ها یکی پاسخگویی به فضای مورد نیاز و دیگری تکامل قوس‌ها (دقیقاً به معنای کامل شدن در جهت هدفی مشخص که اینجا همان کاهش وزن طاق است) در طی تاریخی هزاران ساله است.

در این رویکرد استفاده از روش «تسبیحی» به جای شیوه‌ی «زنجیری» برای تحلیل و محاسبه، منطقی‌تر به نظر می‌رسد. چرا که در روش «تسبیحی» علاوه بر حصول نتیجه‌ای دقیق، اندازه و جهت نیروها در هر نقطه قابل محاسبه است.

در قدم اول، روش «تسبیحی» - که از آن به عنوان روش «فونیکولر» در منابع آنگلساکسون^۹ و لاتین یاد شده - باید به عنوان روشی سراسر است و قابل درک در می‌آمد تا بتوان آن را به صورت گسترده در معماری و مرمت مورد استفاده قرار داد، که بخش عمده‌ای از تلاش این کتاب برای پیدا کردن روش مناسب با هدف فوق صورت گرفته است. هرچند روش محاسباتی ارائه شده توسط «ستپریم ماینی» به نسبت روش «ژاک هیمن»^{۱۰} روش ساده‌تری است، اما اتکای زیاد ستپریم بر حفظیات در کنار تصحیحات زیاد ترسیمی برای رسیدن به جواب

۹- منظور زبان‌هایی با ریشه‌ی Anglo-Saxon است.

۱۰- Jacques Heyman

نهایی، امکان استفاده از این روش را برای بارگذاری نامتقارن و محاسبه‌ی طاق‌های تیزه‌دار مشکل می‌کرد. در نهایت روش محاسباتی استفاده شده در این کتاب بر پایه‌ی روش محاسباتی هیمن بنا شد و برای رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب در تحلیل طاق‌های ایرانی، ترکیبی از روش ترسیمی و حل معادلات تعادل به کار گرفته شد. در حقیقت در طاق‌های تیزه‌دار برای به حداقل رساندن تصحیحات هندسی در محاسبات بر اصول تعادل اتکا می‌کنیم که خود پایه‌ای برای تحلیل و محاسبه به روش «تسبیحی» است.

سادگی و روانی روش ارائه شده به اندازه‌ای است که با دانش کسب شده از ریاضیات و فیزیک دبیرستان قابل فراگیری است. این سادگی، محاسبه‌ی طاق‌ها و گنبدها را برای تمام معماران، مرمت‌گران و مهندسان سازه امکان‌پذیر می‌سازد. در حقیقت یکی از اهداف «احیای معماری خشتی» یکی کردن این حرفه‌ها است. از این پس شما علاوه بر معمار و مرمت‌گر، محاسب سازه‌های خود نیز هستید. چرا که بدون محاسبه و تحلیل سازه در کار با مصالح بنایی، طراحی معماری و مرمت امری مفهومی خواهد بود.

در این مسیر آنچه توجه ما را به خود جلب می‌کند، دست‌آوردهای تکاملی در هندسه‌ی قوس‌های ایرانی است. در اینجا هفده چغد^{۱۱} ایرانی را تحلیل می‌کنیم و مشاهده می‌کنیم که چقدر این تکامل هوشمندانه صورت گرفته است. در پایان نیز جدولی برای مقایسه‌ی وزن و ارتفاع چفدها خواهیم داشت که درک دقیق‌تری از تحول هندسه‌ی آن‌ها به ما می‌دهد.

پویا خزائلی

۱۱- طاقی که عمق آن کوچک‌تر یا مساوی با دهانه‌ی آن باشد.

در ابتدا قصد نداشتم برای این کتاب مقدمه‌ای بنویسم، چرا که آنچه انجام دادم کمک به «کتاب» شدن تحقیقی بود که به طور مستقل پیش برده شده و نسخه‌ی کاملی از آن در اختیارم قرار داده شده بود. هرچند بین یک تحقیق و «کتاب» فاصله‌ای مشخص و در این خصوص هشت ماه کار مداوم است، با این حال طرح این مطلب تعادل را برایم برقرار می‌کند و کمک می‌کند تا درباره‌ی موضوعی که برایم مهم است و در انجام آن قصد و عمد کرده‌ام چند خطی برای شما بنویسم.

در سال‌های اخیر به ضرورت چاپ کتاب برای انتقال مطالب آموزشی که تدریس می‌کنیم پی برده‌ام. آن‌جا که دایره‌ی مخاطبِ کارگاه‌های آموزشی به علت هزینه‌های برگزاری آن، مدام تنگ‌تر می‌شود و امکان استفاده از محتوای این دوره‌ها تنها در اختیار جمع کوچکی قرار می‌گیرد، کتاب کمک می‌کند تا این مسیر ارتباطی همچنان برقرار بماند. این موضوع در رابطه با معماری

خاک اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در معماری با مواد طبیعی، همان قدر که مسالهای مواد و جاذبه‌ی زمین نقش ایفا می‌کند، حضور انسان، حضور انسان به واسطه‌ی انسان بودنش، نه معمار و نه متخصص بودنش، حائز اهمیت است. وقتی به ساختارهای خاکی یا سنگی، به طور کل به ساختارهایی که با دانش تجربی بشر ساخته شده نگاه می‌کنیم، با بخشی از توانایی‌های از دست رفته‌ی خود مواجه می‌شویم. انسان‌هایی که می‌ساخته‌اند در برابر انسان‌هایی که توان ساختن را از دست داده‌اند قرار می‌گیرند. ما به حاصل دست‌های کسانی نگاه می‌کنیم که در تعریف شغلی خود معمار نبوده‌اند. اما خانه‌های خود را ساخته‌اند، سال‌ها در آن‌ها زیسته‌اند و غبار زندگی آن‌ها بر دیوارها باقی مانده است. آن‌ها چه طور انسان‌هایی هستند؟ آیا کسی که می‌داند چه طور مواد را در دست بگیرد، آیا کسی که مواد را می‌شناسد و نحوه‌ی کار با آن‌ها برای ساخت آن‌چه مورد نیازش است را می‌داند، طور دیگری بر زمین نمی‌ایستد؟ آیا زمین زیر پای‌های او محکم‌تر نیست؟ آیا او ساکن سیاره‌ای آشنا تر نیست؟

وقتی ما قصد می‌کنیم تا سررشته‌ی رها شده‌ی این دانش را بیابیم و اگر بتوانیم ادامه‌اش دهیم، با آن چه می‌کنیم؟ قطعاً راهش این نخواهد بود که دانشی انحصاری تولید کنیم. با این کار این دانش انسانی را از محتوای آن تهی می‌کنیم و در نهایت تنها «ماده» در دست ما باقی می‌ماند.

درست همین‌جاست که پیدا کردن راهی که امکان ارتباط بیشتر را فراهم کند اهمیت پیدا می‌کند. ما در این مسیر در نهایت می‌بایست کمک کنیم تا چیزی که از آن هیچ‌کدام ما نیست و هم‌زمان میراث مشترک همه‌ی ماست راه انتقالش را باز کند. انسان‌هایی که مایل به دانستن هستند می‌بایست

دسترسی به محتوای آموزشی داشته باشند. هرچند در مواردی برای آموزش روش‌های ساخت و تمرین مهارت‌های دستی، گریزی از حضور در کارگاه ساخت نیست، اما مباحث نظری که قابلیت انتقال از طریق متن و تصویر را دارند هم کم نیستند. با آموزش در قالب کتاب، این مطالب به واقع «منتشر» می‌شوند. دانشجوی خودشان را فارغ از تحصیلات قبلی، بدون قضاوت در هر سن و مکانی پیدا می‌کنند. شاید کتاب‌ها از این بابت، برای یک مبتدی که از نابلدی‌اش نگران است، از هر کارگاهی شروعی امن‌تر باشند.

به همین جهت است که تمام تلاشم را کردم تا کتاب را تا اندازه‌ی ممکن خواناتر کنم. در همنشینی متن و تصویر، هر جا که لازم بود برای خوانایی بیشتر به تصاویر افزودم. قطعاً حاصل بی‌عیب و نقص نخواهد بود ولی برای این که کتاب در نهایت به چاپ برسد و تا ابد در دست ما نماند می‌بایست در نقطه‌ای از اصلاح آن دست می‌کشیدم و به حاصل تا اینجای کار بسنده می‌کردم.

در رابطه با تصاویر، هر کجا عیناً از تصاویر منابع دیگری استفاده شده و یا حتی بر اساس آن‌ها تصویر جدیدی ترسیم شده است، نام منبع اصلی را در زیر تصویر آورده‌ام. باقی ترسیمات مربوط به خود این کتاب هستند.

بهناز مترجم

Graphical Analysis of THE MASONRY ARCH

Pouya Khazaeli · Behnaz Motarjem

کتاب پیش‌رو با به‌کارگیری روشی ساده و لذت‌بخش، ما را در انجام محاسبات، تحلیل دقیق طاق‌ها و پیش‌بینی رفتار ساختارهای بتّایی توانا می‌سازد. در این روند، محاسبات سازه و معماری به هم‌گره می‌خورند و لذتِ برقراری این ارتباط را با یکدیگر کشف می‌کنیم.

«محاسبه‌ی ترسیمی» خود بر مبنای رسم و هندسه و از جنس معماری است. این دانش که پایه‌ای برای تحلیل طاق‌های ایرانی به ما می‌دهد، کاربرد هریک از قوس‌های تاریخی را بر ما آشکار می‌کند.

پیش از تحلیل سازه‌ای قوس‌ها نیاز بود تا دسته‌بندی منسجمی از آن‌ها ارائه شود. به این منظور فصل اول کتاب به دسته‌بندی قوس‌های ایرانی اختصاص دارد که درست همانند موسیقی دستگاهی ایران، به ما امکان بداهه‌سرایی و خلق فرم‌های نوین در چهارچوب‌های مشخص می‌دهد.

ISBN:978-622-6963-53-4



شهرسازی
معماری و
کتابخانه تخصصی هنر

اصالت و قیمت این کتاب فقط با هولوگرام اختصاصی «کتابکده کسری» تأیید می‌شود.