# تحلیل سیستمیِ فرایند تعادل در اجزای ساختاری بناهای تاریخی؛ مورد مطالعه: تحلیل گرافیکی طاق چهاربخش*

علمی‌پژوهشی

نیما کی‌نژاد**
محمدحسن طالبیان***
سعید خاقانی****

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

## چکیده

رفتار بناهای تاریخی به‌سادگی قابل پیش‌بینی نیست و یکی از راه‌های درک بهتر این رفتار، در نظر گرفتن آن همچون یک سیستم پیچیده است. در نظریهٔ سیستم‌های پیچیده به پدیده‌ها، لایه‌لایه نگاه می‌شود و تمرکز بر روابط میان اطلاعات است. سیستم‌ها با ماهیت متفاوتِ فرایندهایشان در هر لایه، الگوی رفتاری خاصی را بروز می‌دهند که از هم‌افزایی این لایه‌ها، رفتارِ کلِ سیستم پیش‌بینی پذیر می‌شود. از دریچهٔ این نظریه، رفتار در بنای تاریخی مفهوم جامع‌تری را در بر می‌گیرد و تنها شامل سازه نمی‌شود. ازسویی دیگر، پیشینهٔ تحلیلِ سازه در بناهای تاریخی نشان از اهمیت هندسه در حفظِ تعادل بنا دارد؛ درحالی‌که ابزارهای ماشینی که امروزه متداَول هستند، از اصول دیگری در تحلیل‌های خود استفاده می‌کنند و به‌دلیل داشتنِ پیش‌فرض‌های ساده‌انگارانه، نتایج قابل اطمینانی هم ارائه نمی‌دهند. در این مقاله، با تبیین چارچوب مفهومی برای شناخت یک بنای تاریخی براساس نظریهٔ سیستم‌های پیچیده، استدلال می‌شود که تحلیلِ رفتار در یک بنای تاریخی ازسویی منوط به بررسی فرایندهایِ لایه‌هایِ متفاوتِ بناست و ازسویی دیگر، مستلزم به‌کارگیری دانشِ تجربی در این‌گونه بناهاست. سپس، با بررسی سیرِ تاریخیِ تحلیلِ تعادل در بناهای تاریخی، نتیجه‌گیری می‌شود که از ترکیب روش حدی و ابزار استاتیک گرافیکی می‌توان پیچیدگیِ رفتار در عناصر سازه‌ای یک بنای تاریخی را به کمک تحلیل یک فرایندِ اطلاعات‌محور، از مسیر حرکت نیروی رانش در بنا ارزیابی کرد. این مقاله توصیفی‌تحلیلی با پیاده‌سازیِ این شیوه بر روی یک طاق چهاربخش به‌عنوان یک جزء از بنای تاریخی، پیشنهاد خود را به‌صورت عملی ارائه می‌کند.

## کلیدواژه‌ها:

تحلیل سیستمی، نظریهٔ سیستم‌های پیچیده، فرایند تعادل، تحلیل گرافیکی، طاق چهاربخش.

مطالعات معماری ایران
دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۶ ـ پاییز و زمستان ۱۴۰۳
صفحات ۲۲۴-۲۰۵ ۲۰۵

* این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکتری نویسندهٔ اول با عنوان *کاربست نظریهٔ سیستم‌های پیچیده در حفاظت از میراث معماری؛ پیشنهاد مدل شناخت و تحلیل سیستمی از بنای تاریخی* است که با راهنمایی نویسندگان دوم و سوم در دانشکدهٔ معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران در حال انجام است.

** پژوهشگر دکتری مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران
*** استاد، دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، نویسنده مسئول، mh.talebian@ut.ac.ir
**** استادیار، دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران

## پرسش‌های پژوهش

۱. منظور از تحلیلِ سیستمیِ فرایند تعادل در اجزای ساختاری یک بنای تاریخی چیست؟
۲. چگونه می‌توان با روش گرافیکی، یک تحلیلِ سیستمی از عنصری از یک بنای تاریخی ارائه داد؟

## مقدمه

در مورد ۵ از بند پنجم رهنمودهای آموزشی و پرورشی گردهمایی عمومی شورای بین‌المللی ایکوموس که در سال ۱۹۹۳م و در شهر کلمبویِ سری‌لانکا برگزار شد، از معماران، مهندسان و حفاظتگران خواسته شد تا رفتار یادمان‌ها، مجموعه‌ها و محوطه‌های تاریخی را به‌مثابهٔ سیستم‌هایی پیچیده فهم و تحلیل کنند (ICOMOS 1993). بدین مفهوم که کلیهٔ پدیده‌ها سیستم‌هایی متشکل از ماده، انرژی و اطلاعات هستند که میان آن‌ها روابطی برقرار است و توجه به روابط و برهم‌کنش میان آن‌ها در این نگرش، از اهمیت بالاتری نسبت به ماهیت اجزا برخوردار است. پیچیدگی نیز همچون یک طیف است که با تعدادِ اجزا و تراکمِ روابط در هر سیستم مرتبط است و لذا هر سیستمی در هستی در جایی از این طیف قرار می‌گیرد (وکیلی ۱۳۹۸).

براساس این نظریه، رفتارِ کل سیستم مفهوم گسترده‌ای دارد که با نگاهی لایه‌لایه به پدیده، بررسی الگوی خاصِ رفتاریِ سیستم‌هایِ هر لایه و درنهایت، هم‌افزایی این لایه‌ها پیش‌بینی‌پذیر می‌شود. بنابراین، تحلیلِ سیستمی رفتارِ یک بنای تاریخی فراتر از بررسیِ صرفِ رفتار سازه‌ای آن بوده و لایه‌های دیگری را هم در بر می‌گیرد. اما در لایه‌ای که اطلاعات بنا مورد واکاوی قرار می‌گیرد، ارزیابی رفتار، به فرایندهای اطلاعات‌محور در سیستم پایهٔ آن لایه گره می‌خورد و برای مثال، فرایندی مانند تعادل، همچون یک زنجیره از روابط متصل به هم تحلیل می‌شود که مجموعه‌ای از ورودی‌های سیستم، مانند وزن عناصر متفاوت بنا را به یک خروجی معین که همانا حفظ تعادل استاتیکی باشد، متصل می‌کند. در این راستا، توجه به بازخوردهای رفتاری هریک از عناصر بنا (قوس، طاق، گنبد و...)، عامل مؤثری در تحلیل و درنتیجه، رفتار آن به شمار می‌آید. لازم به توضیح است که در نظریهٔ سیستم‌های پیچیده، بازخوردها، خروجی‌هایی از یک سیستم هستند که بتوانند بار دیگر به‌عنوان ورودی به آن بازگردند (وکیلی ۱۳۹۸) و در هر دو حالت مثبت و منفی، نقشی تعیین‌کننده در رفتار یک سیستم ایفا می‌کنند. به ترتیبی که حلقه‌های بازخوردی چگونگی تأثیر اجزا بر یکدیگر را تنظیم می‌کنند و منجر به الگوهای نوظهور و رفتارهای پویا می‌شوند. به عبارت دیگر، این بازخوردها همان دانش تجربی هستند.

آنچه از پیچیدگی در رفتار یک بنای تاریخی به‌عنوان یک سیستم پرده برمی‌دارد، شناختِ رفتار تاریخی در هریک از اجزای این سیستم است. ازسویی دیگر، در عصر فناوری و سیطرهٔ نرم‌افزارهای ماشینی، تحلیلِ بناهای تاریخی ـ که عمدتاً متمرکز بر رفتار سازه‌ای آن‌ها بوده است ـ به دلایلی چون ساده‌سازیِ مصالح در یک بنای تاریخی و تحلیل‌هایی مبتنی‌بر توزیع تنش، نتایج غیرقابل اعتمادی به دست می‌دهند. در چارچوبِ پیشنهادیِ این پژوهش، پیچیدگی‌های رفتار در یک بنای تاریخی، در قالب ارائهٔ انبوه اطلاعات و استفاده از نرم‌افزارهای پیچیده و تخصصی تعریف نمی‌شود، بلکه در پرتو متصور بودن تعدد لایه‌های شناختی و همچنین، انباشت دانشِ تجربی در موضوع مورد پژوهش است که می‌توان این پیچیدگی را بهتر شناخت.

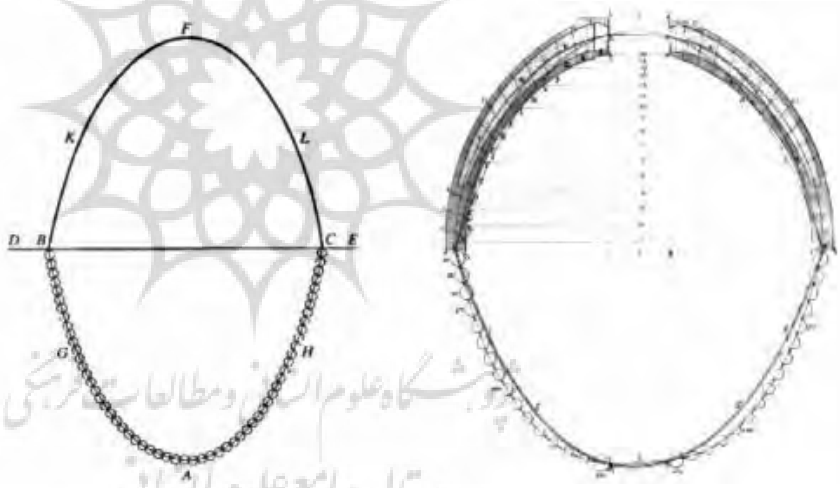
بر این اساس، پیشنهادِ مقالهٔ حاضر در تحلیل، استفاده از روشی است که در آن تحلیلِ فرایند تعادل، از یک مسیر اطلاعات‌محور و با توجه به بازخوردها مورد ارزیابی قرار گیرد. بررسی سیر تاریخیِ موضوعِ نشان می‌دهد که از ترکیب روش حدی و ابزار استاتیک گرافیکی چنین راه‌حلی به دست می‌آید و می‌توان به‌جای سپردن تحلیل به نرم‌افزارهای ماشینی از الگویی ساده در ساحت تجربه بهره برد. مقالهٔ پیش رو، در زمرهٔ تحقیقات بنیادی/ کاربردی قرار می‌گیرد و تلاش دارد تا از دریچهٔ نظریهٔ سیستم‌های پیچیده، چارچوبی را برای شناخت بنای تاریخی و تحلیل فرایندهای آن ارائه دهد. همچنین، با بررسی پیشینهٔ تحلیل موضوع تعادل در بناهای تاریخی، سیر حرکت نیروی رانش در بنا را برای تحلیل

مکانیک سازه‌های تاریخی پیشنهاد می‌کند. این پژوهش با اتکا به پارادایم پیچیدگی (محمدی چابکی ۱۳۹۲) و روش تحلیل محتوا پیش می‌رود و در انتها با پیاده‌سازی نتایج حاصل از مطالعات بر روی یک طاق ایرانی پایان می‌پذیرد.

## ۱. پیشینهٔ پژوهش

در بررسی پیشینهٔ پژوهش، ابتدا به‌صورت مختصر به سیر رویکردهای تحلیل تعادل در بناهای با مصالح بنایی پرداخته می‌شود و در ادامه هم، به چند نمونه از پژوهش‌های انجام‌گرفته در کشور اشاره می‌شود. اگرچه موضوع ترکیب نیروها برای اولین‌بار توسط لئوناردو داوینچی[۱] و گالیله[۲] در ایتالیای امروزی مطرح شد و سیمون استوین[۳] ریاضی‌دان هلندی اولین کسی بود که نیرو را به‌عنوان یک بردار و تفسیر متوازی‌الاضلاعی از نیروها را نشان داد (Paulino 2016)، سیر تاریخی تحلیل سازه‌های با مصالح بنایی، به شیوه‌هایی متفاوت تحول یافته است.

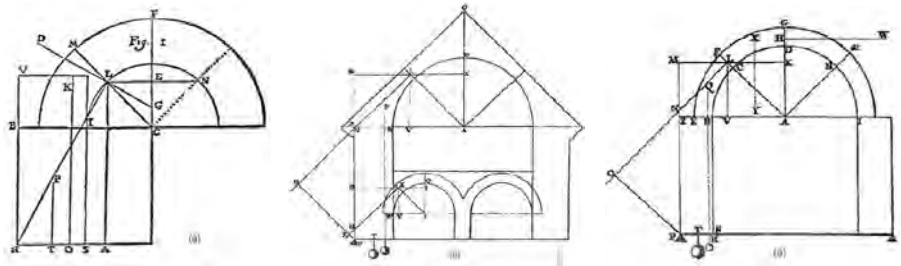
در انگلستان، رابرت هوک[۴] یکی از کسانی بود که موضوع قوس ایدئال و میزان نیروی رانش لازم در برابر تکیه‌گاه‌های قوس را برای نخستین‌بار مطرح کرد. وی در سال ۱۶۷۵م. یک راه‌حل ارائه داد و بیان کرد که همان‌طور که یک خط منعطف معلق می‌ماند، یک قوس صلب نیز در حالت معکوس آن خواهد ایستاد (Hooke 1676). بعد از هوک، گرگوریِ[۵] ریاضی‌دان در سال ۱۶۹۷م، در مقاله‌ای دربارهٔ دانه‌های زنجیر، نظریهٔ هوک را بازگو کرد و اظهار داشت که صرفاً دانه‌های زنجیرشکل یک قوس صحیح را دارا هستند (Gregory 1697).




تصویر ۱: بیان گرافیکی نظر رابرت هوک (Block, DeJong, and Ochsendorf 2006)

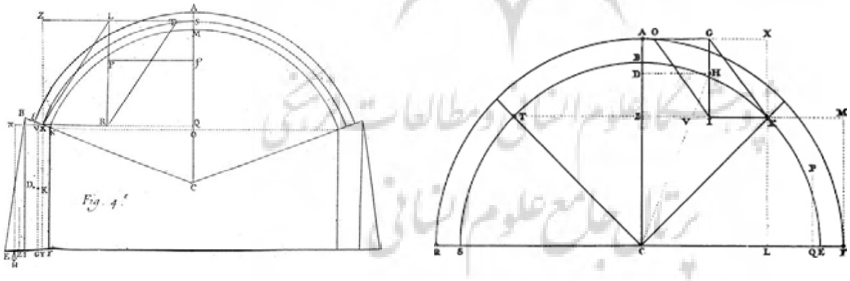
در فرانسه رویکرد اصلی، تئوری مفصلِ مومسان (پلاستیک)[۶] بود. اولین سؤال توسط لائیر[۷] به این صورت مطرح شد که یک قوس نیم‌دایره‌ای متشکل از قطعات سنگیِ بدون اصطکاک با تحمل چه میزان باری می‌تواند در حالت تعادل باقی بماند (La Hire 1695) پیشنهاد وی برای حل این مسئله، استفاده از چندضلعی نیروها بود و اظهار داشت که برای پایدار بودن قوس، میزان بار در پای قوس باید زیاد باشد. اما نقش مهم وی در به دست آوردن رانش قوس برای محاسبهٔ عمق تکیه‌گاه‌های آن بود (Huerta 2008, 300). با این توضیح که در یک قوس یا طاق‌آهنگ فروریخته، قسمت تحتانی به تکیه‌گاه متصل می‌ماند و مفاصل مومسانِ قوس یا طاق‌آهنگ را تشکیل می‌دهند؛ لذا رانش باید از این نقاط عبور کند و همچنین مماس بر قوس درونی باشد. پس از تعیین این نقاط، محاسبهٔ نیروی رانش به‌سادگی انجام می‌پذیرفت، تعادل در بخش بالایی برقرار می‌شد و عمق تکیه‌گاه‌ها هم قابل محاسبه بود؛ اما وی نتوانست نقاط تسلیم را پیدا کند و این عدم قطعیت مانع از کاربرد عملی این تئوری شد (همان).

سپس بِلیدُر[8] سعی کرد تا نقطهٔ گسیختگی را در نیمهٔ مسیر بین تیزه و پای قوس‌ها بیاید و رانش را به درز میانی قوس منتقل کند، به‌طوری‌که جهت آن، موازی با مماس منحنی قوس درونی در مفصل باقی بماند (Belidor 1729). به‌این‌ترتیب، وی توانست یک روش کلی برای محاسبهٔ تکیه‌گاه‌ها برای هر طاق‌آهنگی یا هر ترکیبی از طاق‌های آهنگ در یک بنا پیشنهاد دهد. این نظریه به‌عنوان نظریه‌ای که نیروی اصطکاک را در ساختمان‌های با مصالح بنایی در نظر نمی‌گرفت، شناخته شده است.



تصویر ۲: سمت چپ: نظریهٔ اصلی لائیر (La Hire 1712)، با در نظر گرفتن یک مفصل مومسان، محاسبهٔ نیروی رانش بر مبنای تعادل در بخش بالایی قوس صورت می‌گیرد و می‌توان ضخامت تکیه‌گاه را هم محاسبه کرد. وسط: تغییرات اعمال‌شده توسط بِلیدُر (Belidor 1729) برای نشان دادن محاسبهٔ ضخامت تکیه‌گاه برای هرگونه طاق‌آهنگ، سمت راست: تحلیل یک بنای متشکل از چند طاق‌آهنگ توسط بِلیدُر (Ibid)

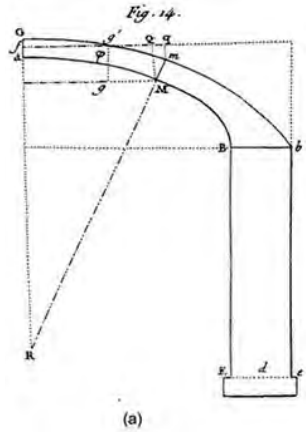
بعدتر کوپلِه[9] در سال ۱۷۳۰م، نظریهٔ خود را در مورد قوس‌ها با در نظر گرفتن نیروی اصطکاک منتشر کرد. او به این موضوع پی برد که زمانی که رانش به داخل قوس درونی برخورد می‌کند، در آن مکان یک مفصل تشکیل می‌شود. وی همچنین توانست ضخامت حدی قوس‌های دایره‌ای را با تقریب زیادی محاسبه کند. به‌علاوه، برای محاسبهٔ تکیه‌گاه برای یک قوس پایدار، رانش را در وسط درزِ تیزه و پای قوس‌ها قرار داد و یک تعادل کلی برای نیمه‌قوس ایجاد کرد (Huerta 2008, 300).



تصویر ۳: نظریهٔ اصطکاک کوپله: سمت راست: محاسبهٔ محدودهٔ ضخامت یک قوس نیم‌دایره، سمت چپ: ثابت نگه داشتن نیروی رانش در وسط درز سنگ شاه‌کلید و پای‌کارهای قوس در نیمه‌قوس برای محاسبهٔ تکیه‌گاه برای یک قوس پایدار از کوپلِه (Couplet 1730)

در سال ۱۷۷۳م، کولُم[10] روش استفاده از ماکزیمم و مینیمم را برای مکان‌یابی صحیح محل نقاط گسیختگی و محاسبهٔ نیروی رانش قوس بیان کرد. برای این منظور، وی تمام حالت‌های ممکن فروریختگی در مفصل را در نظر گرفت و پی برد که در عمل، به‌دلیل ضریب اصطکاک بالای مصالح بنایی، تنها باید خرابی ناشی از چرخش بلوک‌های مصالح بنایی حول مفاصل مومسان (پلاستیک) در نظر گرفته شود (Heyman 1972). در ادامه، یک مهندس فرانسوی به نام اُدی[11] اضافه کرد که با این رویکرد ابعاد به‌دست‌آمده برای تکیه‌گاه‌ها بسیار کوچک خواهند بود و لذا باید از ضرایب ایمنی هم استفاده کرد.





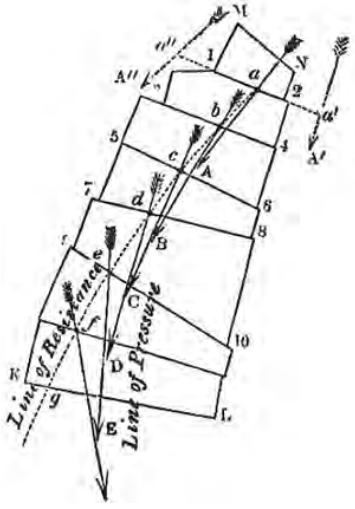
تصویر ۴: روش ماکزیمم و مینیمم (M , m) در تصویر بالا برای تحلیل کُلم برای پیدا کردن محل مفاصل مومسان (Coulomb 1773)

به‌طور خلاصه، رویکرد فرانسوی به تعیین مفاصل تسلیم برای محاسبهٔ نیروی رانش در برابر تکیه‌گاه‌های یک قوس یا طاق با هندسه‌ای معین مربوط می‌شد؛ درنتیجه، سیستم طاق ـ تکیه‌گاه در وضعیت فروریختگی با پنج لولا (یکی در تیزه، دو تا در محل گسیختگی و دو تا هم در پایهٔ تکیه‌گاه‌ها) قرار می‌گرفت. در ادامه، این رانش در یک مقدار معین برای محاسبهٔ عمق تکیه‌گاه ضرب شد. هرچند این نظریه راه‌حل طراحی قوس و نیز نیروهای داخلی درون قوس را ارائه نداد، یک راه‌حل برای محاسبهٔ ایمن اندازهٔ تکیه‌گاه‌ها نشان داد (Huerta 2008, 301).

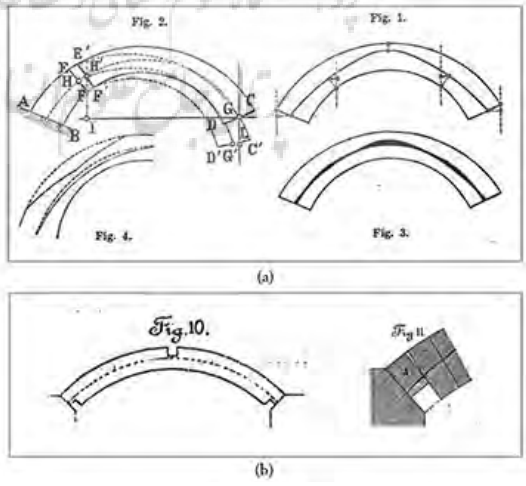
اما یک راه حل پس از بررسی دو رویکرد مذکور که هر دو هم با موفقیت‌هایی مورد استفاده قرار گرفتند، نیاز به یک ایدهٔ جدید برای درک کامل رفتار قوس احساس می‌شد و این همان مفهوم خط رانش بود. خط رانش، مکان هندسی نقطهٔ اعمال رانش‌ها (نیروهای داخلی یا برایند تنش‌ها) با تعداد معینی از اتصالات میان بلوک‌های مصالح بنایی تعریف شد (Moseley 1843). مُزلی این خط را خط مقاومت نامید و آن را برای نشان دادن مسیر نیروهای درونی به کار برد. بدین‌ترتیب، نیروی رانش صرفاً در محدودهٔ اصطکاک میان بلوک‌های مصالح بنایی قرار می‌گرفت و نظر به اینکه بنای با مصالح بنایی در فشار کار می‌کند، خط رانش نیز باید در داخل قوس قرار گیرد. این ایده به‌ترتیب در سه کشور آلمان، انگلستان و فرانسه در فاصلهٔ سال‌های ۱۸۳۰م تا ۱۸۴۰م توسط گِرتسنِر،[۱۲] مُزلی[۱۳] و مِری[۱۴] مطرح شد.

در ادامه، شخصی بهنام پُنسِله،[۱۵] در سال ۱۸۵۲م پیشنهاد کرد که می‌توان یک قوس بنایی را به‌عنوان یک میلهٔ منحنی الاستیک در نظر گرفت (Poncelet 1852). در ادامه، تئوری قوس‌های الاستیک بسیار توسعه یافتند. اما بیست سال زمان برد تا توسط مهندسان به کار گرفته شود، به این دلیل که تفاوت‌هایی میان ساختار واقعی قوس‌های بنایی و خواص ایدئال یک میلهٔ منحنی الاستیک وجود دارد (Huerta 2008, 304).

اولین بررسی دقیق در مورد مشکل اعمال تحلیل الاستیک در قوس‌های بنایی توسط وینکلِر[۱۶] انجام شد (Winkler 1879-80). وی موضوع تخصیص خواص معلوم مصالح و شرایط مرزی در ساخت طاق بنایی واقعی را مطالعه کرد. طاق بنایی دچار مشکلاتی از قبیل گیرش ناقص ملات، تغییرات دما، تغییرات جزئی مرکزها در حین اجرا و مهم‌تر از همه، تسلیم شدن تکیه‌گاه‌ها پس از باز کردن قالب قوس است که منجر به ایجاد ترک‌های قابل مشاهده و تغییراتی بزرگ در خط رانش می‌شد (Huerta 2008, 304). پیشنهاد وینکلر محاسبه برای موقعیت ایدئال قوسی بود که در آن ملات در تمام درزها کاملاً به‌صورت یکنواخت درگیر باشد، قالب کاملاً ثابت، دما ثابت و تکیه‌گاه‌ها هم بسیار صلب باشند. وینکلر این وضعیت قوس را وضعیت نُرمال نامید. محاسبهٔ الاستیک قوس برای این حالت نرمال خط رانش صحیح را مشخص می‌کرد و خط رانش الاستیک بیشتر به خط مرکزی نزدیک می‌شد (همان).



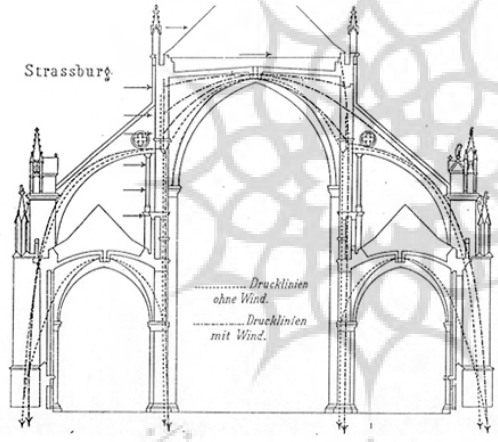

تصویر ۵: مفهوم خط رانش: مکان هندسی تقاطع نیروهای رانش (نیروهای داخلی یا برایند تنش‌ها) با درزهای میان بلوک‌های مصالح بنایی که مزلی آن را خط مقاومت نامید. ترسیم این خط مسیر نیروهای درونی را نشان می‌دهد (Moseley 1843)




تصویر ۶: تصویر a: تحلیل وینکلر برای اینکه نشان دهد که خط رانش الاستیک به خط مرکزی نزدیک‌تر است؛ b: اقدامات پیشنهادی برای حفظ موقعیت خط رانش مانند کاستن از سنگ شاه‌کلید قوس (Winkler 1879-80)

تا این زمان تحلیل الاستیکی قوس‌ها بهترین رویکرد نظری شناخته می‌شد؛ چراکه با دانستن موقعیت خط رانش نیروهای داخلی قوس شناسایی می‌شد. بااین‌حال، در عمل رویکرد متداول برای بررسی پایداری، روش استاتیک گرافیکی بود. اگر بتوان یک خط رانش را در یک‌سوم میانی قوس ترسیم کرد، آن قوس ایمن خواهد بود، زیرا شرایط هندسی منجر به توزیع تنش‌های فشاری در تمام مقطع می‌شود. این پیشنهاد توسط رانکین[۱۷] به‌عنوان یک قضیه بیان شد و با قرار دادن خط رانش در یک‌سوم میانی، دیگر امکان ایجاد ترک وجود نداشت (Rankine 1858).

اما تحلیل گرافیکی سازه‌ها به‌طور سیستماتیک توسط کولمَن[۱۸] در سال ۱۸۶۶م پیشنهاد شد. وی استفاده از چندضلعی‌های فونیکولار[۱۹] و چندضلعی‌های نیرو را در تحلیل قوس‌ها مرسوم کرد و به‌این‌ترتیب، روشی آسان و عملی برای بررسی پایداری قوس‌ها و تکیه‌گاه‌ها به دست داد (Maurer 1998). در حدود سال ۱۹۰۰، انتقاد از نظریهٔ الاستیک به‌علت فراگیر بودن آن به‌سختی امکان‌پذیر بود. سواین[۲۰] در کتاب خود، دربارهٔ استاتیک گرافیکی به تعدادی از فرض‌های نادرست در کاربرد نظریهٔ الاستیک در بناهای با مصالح بنایی پرداخت و بینش خود را برای استفاده از قضیه ایمن نشان داد که عبارت بود از اینکه اگر بتوان یک خط (محور) مقاومت در داخل قوس رسم کرد، قوس پایدار خواهد بود (Foce 2005).




تصویر ۷: تحلیل گرافیکی و تعیین دو مسیر نیروی رانش (یکی خطوط فشار با باد و دیگری بدون باد) بنا تا رسیدن به زمین در یک مقطع از کلیسای جامع شهر استراسبورگ توسط اونگِویتر (Ungewitter 1890)

با وجود اینکه رویکرد استاتیک گرافیکی کولمَن با پایهٔ نظری قوی در ریاضیات و هندسه یک روش تحلیل دقیق برای خرپاها، قوس‌ها، کابل‌ها و سایر سیستم‌های سازه‌ای فراهم می‌کند و به قول ویلیام ولفی نویسندهٔ کتاب *تحلیل گرافیکی*[۲۱] بخش عمده‌ای از محاسبات در مهندسی ساختمان را هم می‌توان به روشی ساده‌تر و با استفاده از تحلیل‌های گرافیکی یا هندسی انجام داد، امروزه تعداد کمی از مهندسان یا معماران به آن گرایش دارند (Wolfe 1921). نویسندهٔ کتاب منتشرشده در سال ۱۹۲۱م اضافه می‌کند که به کمک روش گرافیکی در زمان و میزان کار صرفه‌جویی می‌شود و با حل کلی مسائل به این روش می‌توان صرفاً در بخش‌های خاصی، از روش‌های تحلیلی استفاده کرد. همچنین ساختارهای گرافیکی اغلب درک چگونگی اعمال تنش‌ها و تحلیل آن‌ها را آسان‌تر می‌کند. در عمل نیز به هر میزان بتوان چگونگی هدایت تنش‌ها را ازطریق یک عضو یا کل سازه پیش‌بینی کرد، قضاوت بهتری به دست می‌آید؛ به‌ویژه، اگر زمان لازم برای یافتن راه‌حل‌های دقیق‌تر وجود نداشته باشد، این روش بدون داشتن نیاز به فرمول‌هایی پیچیده بسیار مناسب عمل خواهد کرد (Ibid, 2).

از نخستین اشارات به موضوع تحلیل گرافیکی برای قوس‌ها را غلامحسین معماریان در کتاب خود انجام داد. وی در کتاب *نیارش سازه‌های طاقی در معماری اسلامی ایران* به ایستایی قوس و رفع رانش به نقل از کاتالدی[۲۲] دراین‌باره

توضیحاتی مصور ارائه می‌کند (معماریان ۱۳۶۷). از پژوهش‌های دیگر در این زمینه می‌توان به مقالات فرزین ایزدپناه اشاره کرد. وی در مقاله‌ای، به تحلیل سازه‌های طاقی بنایی به روش‌های ترسیمی، حدی و مبتنی بر جابه‌جایی می‌پردازد؛ اما پیش از آن نیز، در پژوهشی دیگر به سیر تاریخی خط فشار در تحلیل سازه‌های با مصالح بنایی اشاره دارد (ایزدپناه ۱۳۹۳ الف). همچنین، در نوشتاری، تعدادی از تحقیقات صورت‌گرفته در چارچوب تحلیل به روش حدیِ ژاک هیمن را با مضمون تعیین محدودهٔ ایمن برای بناهای مصالح بنایی، در وضعیت‌های استاتیکی و دینامیکی بررسی می‌کند (ایزدپناه ۱۳۹۳ب). سپس در مقاله‌ای دیگر نتایج حاصل از تحلیل با روش حدی در پایداری سه قوس تخم‌مرغی، مربعِ پاتوپای نیزه‌ای و قوس پنج و هفت تند را به کمک مدل‌های فیزیکی ساخته‌شده از این سه قوس مقایسه می‌کند (ایزدپناه و سرداری ۱۳۹۹). طاها صباغیان در سال ۱۴۰۱ اظهار می‌کند ضمن این‌که روش استاتیک گرافیکی درک عمیقی از مفاهیم پیچیدهٔ سازه‌ای برای معماران به کمک دیاگرام‌های دوبعدی از نیرو ایجاد می‌کند، ظرفیت افزایش دقت و سرعت با استفاده از زبان برنامه‌نویسی را هم داراست (صباغیان و مختاباد امرئی ۱۴۰۱). در همین سال، کیارش ارکانی در مقاله‌اش اشاره دارد که این روش به‌سبب بهینه بودن مسیر انتقال نیرو و تقسیم آن به اعضای سازه‌ای، سبب کاهش حجم سازه و بهبود عملکرد آن در طراحی می‌شود. وی در ادامه به مقایسهٔ بین دو سازه در حالت صرفاً ثقلی و تحت بار لرزه‌ای استاتیکی معادل و تفاوت‌های بین این دو روش پرداخته است (ارکانی و حمیدی ۱۴۰۱). در سال ۱۴۰۲ نیز، پویا خزائلی در کتاب خود به تحلیل سازهٔ قوس‌های بنایی و توضیح اصول روش هیمن در درک رفتار نیروهای طاق مبادرت می‌ورزد و در ادامه، روش ترسیمی تحلیل قوس‌ها را به‌تفصیل تبیین می‌کند (خزائلی و مترجم ۱۴۰۲).

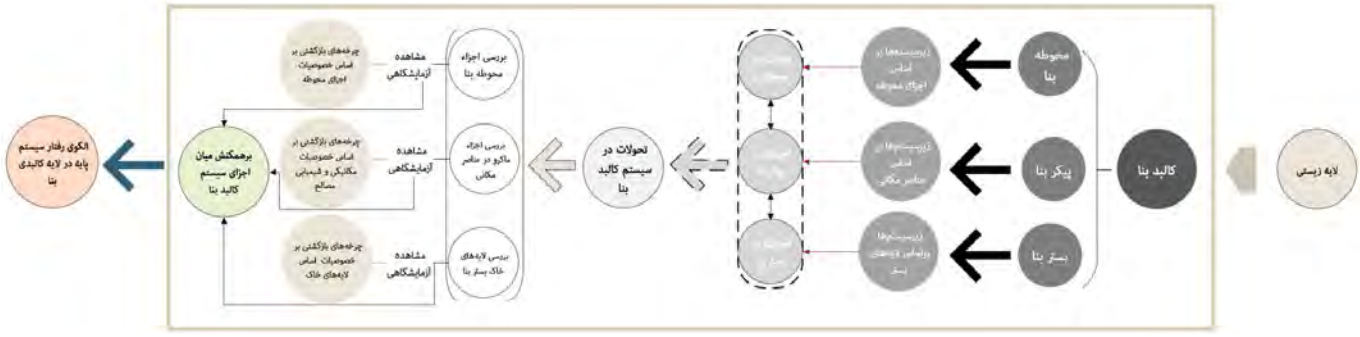
گفتنی است که موضوع به‌کارگیری نظریهٔ سیستم‌های پیچیده در حوزهٔ حفاظت از میراث معماری و شهری اصولاً امری نو به شمار می‌آید و نگارندگان در مقالهٔ دیگری[۲۳] به پیشینهٔ آن پرداخته‌اند؛ اما موضوع تحلیل سیستمی از یک بنای تاریخی برای نخستین‌بار است که مطرح می‌شود.

## ۲. مبانی نظری

### ۲.۱. چارچوب سیستمیِ پیشنهادی برای تحلیل رفتار یک بنای تاریخی

همان‌طور که پیش‌تر نیز بدانَ اشاره شد، گام اول در راستای تبیین چارچوب سیستمی، تفکیک لایه‌های شناخت موضوع پژوهش است. برای یک بنای تاریخی می‌توان سه لایهٔ شناختی در نظر گرفت. عناوین در نظر گرفته شده برای این لایه‌ها، برگرفته از لایه‌های نظامِ کنش از تالکوت پارسونز[۲۴] است که در کتاب *ساختار کنش اجتماعی*[۲۵] بدان اشاره شده است. بدین‌صورت که تحتِ عنوان نظریهٔ سیستم‌هایِ پارسونز، هر نظامی متشکل از چهار خرده‌نظام زیستی، روانی، اجتماعی و فرهنگی شمرده می‌شود. در لایهٔ نخست یا لایهٔ زیستی که ماهیتی ساختاری دارد، چیدمان عناصر یک سیستم (در اینجا بنای تاریخی) و نوع ارتباط میان آن‌ها در برشی از زمان بررسی می‌شود؛ یعن تصور می‌شود که بنا در وضعیت موجودش منجمد شده است و تک‌تک اجزای آن که از جنس ماده و انرژی هستند، مورد واکاوی قرار می‌گیرند. این همان است که به‌عنوان شناخت از وضع موجود بنا فهم می‌شود. سیستم پایه در این لایه کالبد بنا و متغیری که درصدد بیشینه شدن است، بقای بناست. به عبارت دیگر، هدف در اینجا افزایش طول عمر بنا از دریچهٔ اجزای سازندهٔ آن است که البته با توجه به درجهٔ درشت‌نماییِ لنز مطالعه این اجزای سازنده را می‌توان خشت، آجر یا... در نظر گرفت و یا اجزای درشت‌تری مانند دیوار فرض کرد. بر مبنای این انتخاب، به‌ترتیب چرخه‌های مکانیکی (در اجزای ماکرو) یا شیمیایی (در اجزای میکرو) اهمیت بالاتری پیدا می‌کنند. بدیهی است که به هر میزان که مقیاس بررسی خردتر باشد، دقت و زمان و درنتیجه حجم داده‌ها بسیار بیشتر خواهد بود و به این دلیل، در تحقیق پیش رو، اجزای ماکروی بنا مد نظر قرار گرفته‌اند. نتایج مشاهدات در این لایه بر مبنای تجربه و مستندات آزمایشگاهی ارائه می‌شود و از آن تحت عنوانِ اطلاعات ساختاری بنا یاد می‌شود که می‌تواند معادل اطلاعات ذاتی بنا در نظر گرفته شود. با توجه به ماهیت فرایندها در این لایه، چیستی بنا در مرکز توجه است و لذا علت رخدادها در بنا، مورد پرسش نخواهد بود. برای سیستم کالبدی می‌توان زیرسیستم‌هایی هم در نظر گرفت. تحولات کلِ سیستم (آسیب‌های بنا) در چارچوبِ روابط میان این

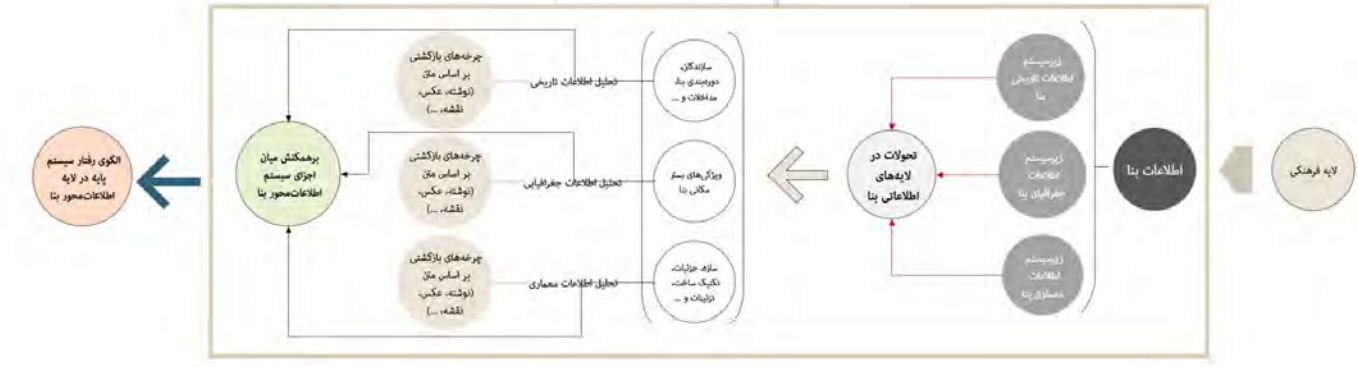
زیرسیستم‌ها شناسایی می‌شوند. بررسی اجزای سیستم و برهم‌کنش میان آن‌ها یک الگوی رفتاری در این لایه به دست می‌دهد. در دیاگرام زیر، یک نمای کلی از روند دستیابی به الگوی رفتاری در لایهٔ زیستی نمایش داده می‌شود.




تصویر ۸: فرایند حصول الگوی رفتاری در لایهٔ زیستی

لایهٔ دوم با نام لایهٔ فرهنگی، ماهیتی کارکردی دارد و در آن، شیوهٔ تحول عناصر سازندهٔ بنا و روابط میان آن‌ها در یک مسیر زمانی بررسی می‌شود؛ یعنی اجزای بنا از بدو شکل‌گیری تا امروز، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. جنس عناصر این سیستم از اطلاعات است و همان است که به‌عنوان آسیب‌شناسی اجزای بنا شناخته می‌شود. سیستم پایه در این لایه را می‌توان اندیشهٔ شکل‌دهندهٔ موجودیت بنا در نظر گرفت؛ یعنی هرآنچه از اطلاعاتِ بنا که می‌توان آن را از مجرای زبانی بیان کرد مانند عکس‌های تاریخی، کروکی، نقشه‌ها و کلیهٔ متون موجود دربارهٔ بنا که همگی با عنوان کلی طرح بنا خلاصه می‌شود. آنچه در این لایه بیشتر اهمیت دارد، معنایی است که از اطلاعات باارزش احصا می‌شود. با این توضیح که معنا در نظریهٔ سیستم‌های پیچیده به پردازش اطلاعاتی گفته می‌شود که در فرایندهای سیستم نقش دارند. لذا در فرایندی مانند تعادل، اطلاعاتی چون هندسه و ضخامت اجزا و وزن مخصوص مصالح آن‌ها می‌توانند مؤثر باشند. در این لایه چگونگی رخدادها در بنا توضیح داده می‌شود و چرخهٔ تبادل اطلاعات از مجرای رسانه (زبان گفتاری و نوشتاری) برقرار می‌شود. همچنین، ارزیابی‌ها در این لایه از نوع تحلیل خواهند بود و با نام اطلاعات کارکردی شناخته می‌شوند و می‌توان آن را معادل اطلاعات اکتسابی هم در نظر گرفت. در این مقاله چنانچه اطلاعات سازه به‌عنوان یک زیرسیستم از اطلاعات معماری بنا در نظر گرفته شود، آن دسته از اطلاعاتی که عهده‌دار حفظ ایستاییِ بنا هستند، همچون فرایندی تحلیل می‌شود که در آن، یک سری ارتباطات پویا و عناصر متصل به آن‌ها (مسیر نیروی رانش و اجزای سازه‌ای متصل به یکدیگر)، تعادل بنا را تضمین می‌کنند. در مقالهٔ حاضر، روش مورد نظر در یکی از اجزای بنای تاریخی (طاق چهاربخش) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تصویر زیر یک نمای کلی از روند دستیابی به الگوی رفتاری در لایهٔ فرهنگی نمایش داده می‌شود.

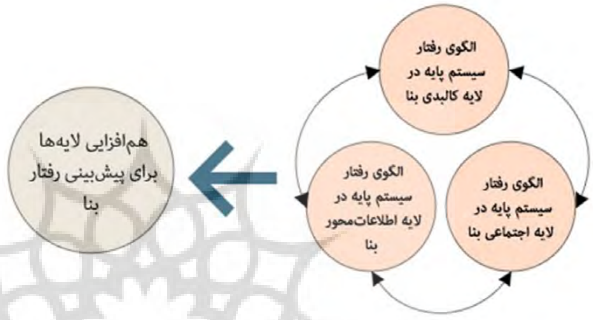





تصویر ۹: فرایند حصول الگوی رفتاری در لایهٔ فرهنگی

یک لایهٔ سوم با نام لایهٔ اجتماعی نیز با ماهیتی ساختاری می‌توان متصور شد که بر پایهٔ ارتباط میان مدارهای قدرت، نقشِ اندرکنش میان نهادهای ذی‌مدخل در حیات بنا را در جامعهٔ میزبانِ بنا بررسی می‌کند. تحلیلِ ماهیت فرایندهای این لایه جامعه‌شناسانه است و در روش مشاهده، شیوه‌ای مبتنی‌بر تجربه‌های گذشته و فهم رخدادهای جامعه دارد. هرچند در راستای شناخت رفتار کلی در یک بنای تاریخی نمی‌توان نقش این لایه را نادیده گرفت، با توجه به موضوع و نمونهٔ مورد مطالعه در مقالهٔ حاضر، از ارائهٔ توضیحات بیشتر دربارهٔ این لایه صرف نظر می‌شود.

گام نهایی در تبیین چارچوب نظری پیشنهادی، هم‌افزایی لایه‌های شناختی با هدف پیش‌بینی رفتار بنای تاریخی است. منظور از هم‌افزایی این است که تعاملاتِ ترکیبی در اجزای سیستم، منجر به بروز رفتاری می‌شود که متفاوت از آن چیزی است که از جمع اجزای منفرد سیستم حاصل می‌شود.




تصویر ۱۰: فرایند پیش‌بینی رفتار بنای تاریخی به‌عنوان یک سیستم پیچیده

اما سیستم‌های پیچیده دارای ویژگی‌هایی نیز هستند که شناخت این ویژگی‌ها به درک بهتر رفتار آن‌ها کمک می‌کند. ازجمله اینکه اجزای آن‌ها با یکدیگر و با محیط اطرافِ خود به روش‌های مختلفی برهم‌کنش دارند. دارای رفتاری غیرخطی هستند و ویژگی سیستم پیچیده به‌عنوان یک کل، نسبت به ویژگی اجزای آن به‌صورت تک‌تک بسیار متفاوت بوده و معمولاً منجر به بروز یک الگوی رفتاری غیرمنتظره در کل سیستم می‌شود که از آن به ویژگی ظهور یاد می‌شود. همچنین، سیستم‌های پیچیده می‌توانند سازگار شوند و تحول یابند (De Domenico et al. 2019).

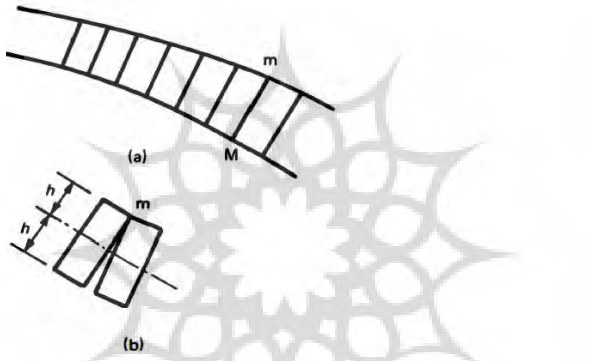
همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، روش‌های ماشینی در تحلیل بناهای تاریخی ابزارهای دقیقی برای ارزیابی رفتار آن‌ها به حساب نمی‌آیند؛ چنان‌که برای مثال روش مدل‌سازی المان محدود در توصیف رفتار سازه‌های تاریخی دارای نقصان‌هایی است. ازجمله اینکه مقاومت کششی بسیار محدود این بناها و بروز یک رفتار کلی را نمایان نمی‌کنند و همچنین، عدم همسانگردی (ایزوتروپی) و همگنی در مصالح بناهای تاریخی را در نظر نمی‌گیرند (Blasi 2016).

لذا در انتخاب روش و ابزار تحلیل فرایندی مانند تعادل در یک بنای تاریخی باید شیوه‌ای را انتخاب کرد که اولاً قابلیت بروز ویژگی‌های یک سیستم پیچیده را دارا باشد و ثانیاً در مقایسه با روش‌های مرسوم با تکیه بر تجارب گذشتگان، بازخوردهای رفتاریِ تک‌تکِ اجزای بنا را در تحلیل‌ها مد نظر قرار دهد.

### ۲. ۲. روش تحلیل حدی

روش حدی نخستین‌بار برای قاب‌های فولادی به کار گرفته شد و هرچند پیش از ژاک هیمن کسانی بودند که به آن اشاره کرده بودند، وی نخستین کسی بود که از آن در بناهای با مصالح بنایی به‌صورت گسترده بهره برد و مبانی نظری آن را در مقالهٔ مهمی که در سال ۱۹۶۶م منتشر کرد، توضیح داد. او برای استفاده از این روش شروطی را در نظر گرفت که بعدتر به نام اصول هیمن شناخته شدند. در مقالات و کتاب‌های این نویسنده، نحوهٔ به‌کارگیری روش حدی در همهٔ اجزای بناهای با مصالح بنایی و نیز ارزیابی این بناها با عاملی به نام ضریب ایمنی هندسی تشریح داده شده است (Huerta 2008). این اصول عبارت‌اند از: ۱. مصالح بنایی مقاومت فشاری بی‌نهایت (بسیار زیاد) دارد. اگرچه این

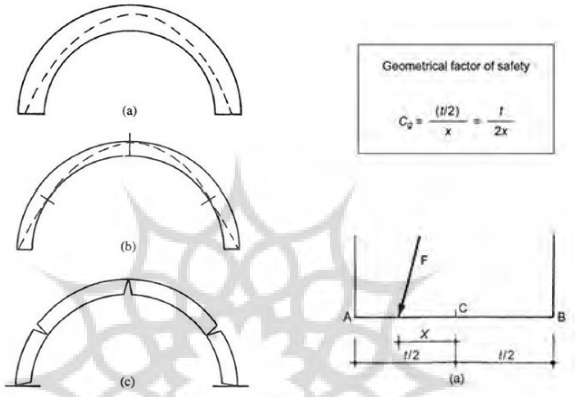
موضوع به نظر منطقی نمی‌رسد و بالاخره سطوحی از تنش در این‌گونه بناها وجود دارد، نسبت آن‌ها به مقاومت فشاری مصالح بنایی بسیار کمتر است. درهرحال این فرضیه‌ای است که پس از پایان تحلیل حدی بنا می‌توان آن را آزمود؛ ۲. بنای با مصالح بنایی مقاومت کششی صفر (بسیار ناچیز) دارد. این شرط تا حد زیادی محقق می‌شود، زیرا میان بلوک‌های مصالح بنایی ملات در هر صورت وجود دارد که در کشش بسیار ضعیف است؛ بنابراین تعامل بین بلوک‌های بنایی باید ازطریق نیروهای فشاری باشد؛ ۳. لغزش میان بلوک‌های مصالح بنایی غیرممکن است، زیرا اصطکاک ایجادشده براثر تنش‌های فشاری مانع از جابه‌جایی و لغزش می‌شد. بازهم ممکن است این شرایط بررسی شود. این فرضیه هم درست است و هم در پایان تحلیل قابل ارزیابی (Huerta 2001). چنانچه مصالح بنایی این شروط را در یک مقطع معین از بنا برآورده کند، حاصل تنش‌های فعال باید به‌صورت نیروی فشاری در داخل مقطع باشد. مطابق تصویر زیر، زمانی که این تنش (نیروی رانش بین دو قطعه‌سنگ مجاور) در مرز آن دو عمل کند، یک مفصل تشکیل می‌شود و این منجر به یک سطح تسلیم شده که از دو خط مستقیم تشکیل شده است (Huerta 2008).




تصویر ۱۱: تشکیل مفصلی میان دو بلوک از مصالح بنایی (Heyman 1995)

زمانی که قالب قوس بنایی برداشته می‌شود، قوس از دو طرف به‌سمت تکیه‌گاه‌های خود نیروی رانش وارد می‌کند و ازآنجاکه این تکیه‌گاه‌ها کاملاً صلب نیستند، به میزانی تسلیم خواهند شد؛ درنتیجه، دهانهٔ قوس افزایش یافته و هندسهٔ آن نیز تغییر می‌کند. علت این مکانیزم ایجاد سه ترک در قوس است: یکی در خیز قوس (سنگ شاه‌کلید) به‌سمت پایین و دو تای دیگر در تکیه‌گاه‌ها به‌سمت بالا؛ هرچند که حرکت قوس به‌سمت دو تکیه‌گاه الزاماً متقارن نیست و امکان دارد یک تکیه‌گاه علاوه‌بر حرکت در جهت افقی در جهت عمودی هم جابه‌جایی داشته باشد. متناسب با هر حرکتی یک الگویی از ترک‌خوردگی وجود دارد و با باز و بسته شدن ترک امکان پاسخ قوس به تهاجمات محیطی را فراهم می‌کند. اما این ترک‌ها خطرناک نیستند و ظرفیت سازه برای پاسخ‌گویی به اثرات محیط را نشان می‌دهند که از ویژگی‌های مصالح بنایی آن منتج شده است. این ویژگی‌ها همان مقاومت فشاری زیاد، مقاومت کششی کم و عدم امکان لغزش هستند. ترک‌ها موقعیت خط رانش را تعیین می‌کنند و با وجود اینکه تشخیص محل دقیق این خط غیرممکن بوده، دو حد نهایی می‌توان برای آن متصور شد که منطبق بر حداکثر و حداقل نیروی رانش است (Huerta 2005). ترک‌ها مانند مفصل عمل می‌کنند و موجب تغییر شکل‌های غیرالاستیکی در سازه می‌شوند. در واقع، سازه توسط تعدادی ترک به هم مرتبط می‌شود و لذا امکان حدی از حرکت را داراست. زمانی که خط رانش از مرز بنا عبور کند، مفصلی تشکیل می‌شود که امکان چرخش را فراهم می‌کند. قوس با سه مفصل ازنظر استاتیکی معین است، اما با افزایش بار مفصل چهارم متناوب هم تشکیل می‌شود که منجر به فروپاشی قوس بدون خردشدگی مصالح آن می‌شود (Idem 2001). پیش‌تر از عاملی به نام ضریب ایمنی هندسی یاد شد که می‌تواند در ارزیابی تعادل بنا به کار رود. برای این منظور کافی است ضخامت قوسی متعادل را که یک خط رانش درون آن قرار دارد نصف کرد. چنانچه در این وضعیت خط رانش

در پنج نقطه مرز قوس را لمس کند، پنج مفصل تشکیل می‌شود و درنتیجه قوس هم ناپایدار خواهد شد (تصویر ۱۲). با مقایسهٔ ضخامت قوس اصلی با قوسی که ضخامت آن نصف شده است، می‌توان این ضریب را محاسبهٔ سرانگشتی کرد و به نظر می‌آید این موضوعی است که توسط بسیاری از معماران و مهندسان به‌صورت شهودی در سه قرن گذشته (برای مثال در آثار گائودی) درک می‌شده است (Idem 2008). این عامل ازآن‌رو حائز اهمیت است که به تحلیلگر امکان می‌دهد تا به‌جای تلاش در یافتن تنها خط رانش موجود در اجزای ساختاری بنا (که عملاً غیرممکن است) صرفاً به یک وضعیت از میان وضعیت‌های ممکن دست یابد و ایمنی بنا را تضمین کند. این رویکرد در مورد یک طاق بنایی با تقسیم به تعدادی از قوس‌های تشکیل‌دهندهٔ آن امکان‌پذیر می‌شود (Idem 2001).




تصویر ۱۲: عامل ضریب ایمنی هندسی در مقطعی از یک تکیه‌گاه (Huerta 2010)

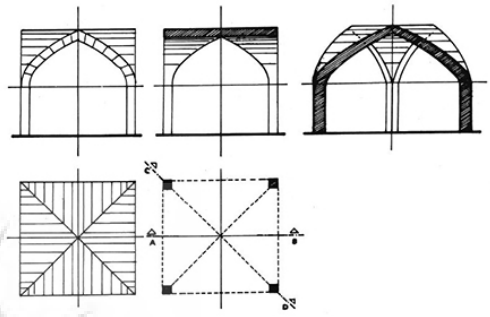
تصویر ۱۳: قوس نیم‌دایره پایدار و ضخامت حدی آن (Heyman 1995)

## ۲. ۳. ابزار استاتیک گرافیکی

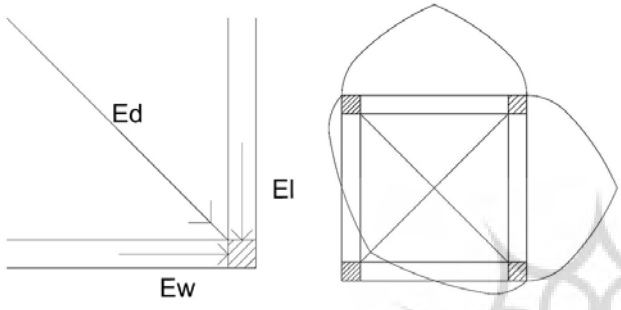
اساس استاتیک گرافیکی در شناسایی یک نیرو به‌عنوان یک بردار جهت‌دار نهفته است (Benvenuto 1981). از قرن سوم قبل از میلاد تا هفدهم پس از میلاد، مفهوم نیرو دقیقاً تعریف نشده بود. مکاتب مختلف فکری سعی کردند نیرو را با تفاسیر مختلف از مفاهیم پویایی، قدرت، پتانسیل، حرکت (الهام‌گرفته از ارسطو)، کنش، انرژی، تنش تعریف کنند (Idem 1991). شروع یک تغییر پارادایم تنها بین پایان قرن پانزدهم و آغاز قرن شانزدهم با شیوه‌های فونیکولار معرفی‌شده توسط لئوناردو داوینچی اتفاق افتاد (Aita 2023). طناب به نیروی کششی تبدیل می‌شود که در راستای آن عمل می‌کند. علاوه‌بر این، امکان انحراف خط نیرو نیز وجود دارد. روش‌های فونیکولار بعدتر توسط استوین[۲۶] (۱۶۰۸) مورد مطالعه قرار گرفتند. اما این وارنیون[۲۷] بود که در سال ۱۶۸۷م با تحلیل تعادل توسط طنابی که وزنه‌ها را تحمل می‌کرد و برای اولین‌بار هرچند به‌صورت تجربی برخی از نکات کلیدی استاتیک گرافیکی مانند چندضلعی فونیکولار منطبق بر صورت‌بندی تعادل ریسمان را به دست آورد (Sinopoli 2012). در معنای امروزی، ریشه‌های استاتیک گرافیکی را می‌توان در حدود سال ۱۸۳۵م یافت (Culmann 1866)، زمانی که پُنسِله (۱۸۳۵) روش خود دربارهٔ راه‌حل گرافیکی مسائل اصلی در مورد پایداری طاق‌ها را منتشر کرد و استفادهٔ سیستماتیک از روش‌های گرافیکی الهام‌گرفته از توصیفات هندسی مُنژ[۲۸] را به کار برد. در سال‌های بعد، توسط برسه[۲۹] (۱۸۸۰)، کولمان (۱۸۶۶، ۱۸۷۵، ۱۸۸۰)، رانکین (۱۸۶۴)، ریتر[۳۰] (۱۸۸۸) و کرمونا[۳۱] (۱۸۹۰)، استاتیک گرافیکی شأن یک رشتهٔ مستقل را به خود گرفت که قادر به توصیف ویژگی‌های اشکال هندسی یک، دو و سه‌بعدی است و در محاسبات سازه‌ای به کار برده می‌شود. در سال ۱۹۹۸م، نیز زالوسکی[۳۲] و آلن[۳۳] کتاب درسی جدیدی[۳۴] منتشر کرده‌اند که در آن مزایای استاتیک گرافیکی را برای طراحی ستایش می‌کنند و نشان می‌دهند که کاربردهای جدیدی در استفاده از این روش تحلیل تاریخی وجود دارد.

## ۳. تحلیل گرافیکی طاق چهاربخش

در این بخش به‌عنوان نمونه‌ای از اجزای ساختاری معماری ایرانی، یک طاق چهار بخش درزمینهٔ مربع در نظر گرفته می‌شود (تصویر ۱۴). علت این انتخاب قابلیت تقسیم آن به تویزه‌های اصلی در راستای توضیح دقیق‌تر روش مورد نظر است. فرض می‌شود مقطع این طاق بخش کوچکی از مقطعی از بناست و هدف از تحلیل، تعیین بارهای وارده ازطرف اجزای طاق به یکی از تکیه‌گاه‌های آن است (تصویر ۱۴). برای این منظور، کافی است نیمی از طاق تحلیل شود. ابتدا قوس‌های متناظر (در این مثال پنج از هفت) یک طول، یک عرض و یک قطر از پلان طاق ترسیم می‌شود (تصویر ۱۵).

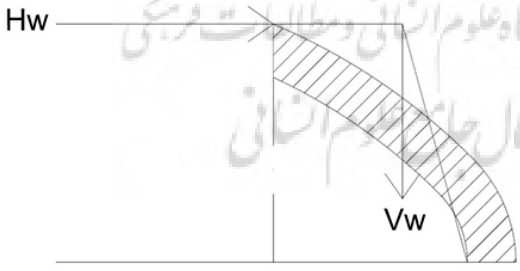


تصویر ۱۴: سمت چپ: پلان، نما و برش‌هایی از یک طاق چهاربخش (معماریان ۱۳۶۷) و نیروهای وارده بر یکی از تکیه‌گاه‌های آن



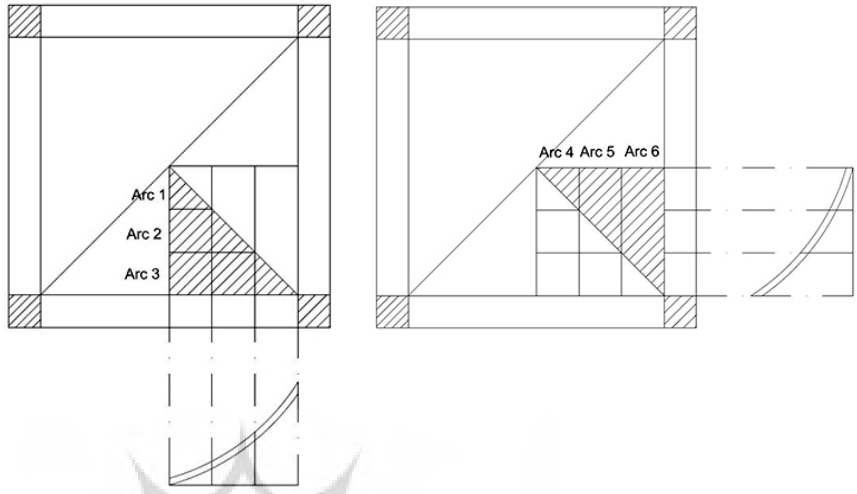

تصویر ۱۵: سمت راست: ترسیم قوس‌های متناظر یک طول، عرض و قطر از پلان طاق

با توجه به اینکه طول و عرض دهانهٔ طاق در این مثال برابر است، برای به دست آوردن نیروی رانش در یکی از آن‌ها (برای نمونه در عرض w)، نصف قوس متناظر در نظر گرفته شده و مؤلفهٔ عمودی نیروی رانش (Vw) در حالت حدی (در اینجا مینیمم) از حاصل‌ضرب مساحت مقطع قوس در ضخامت و وزن مخصوص مصالح تشکیل‌دهنده (مثلاً آجر) محاسبه می‌شود (تصویر ۱۶). سپس با توجه به راستای برداری که از پای قوس درونی در این حالت عبور می‌کند، می‌توان ازطریق جمع برداری نیروها به روش مثلثی، با داشتن مؤلفهٔ عمودی، مؤلفهٔ افقی نیروی رانش (Hw) و همچنین برایند آن، یعنی (Ew) را هم به دست آورد.



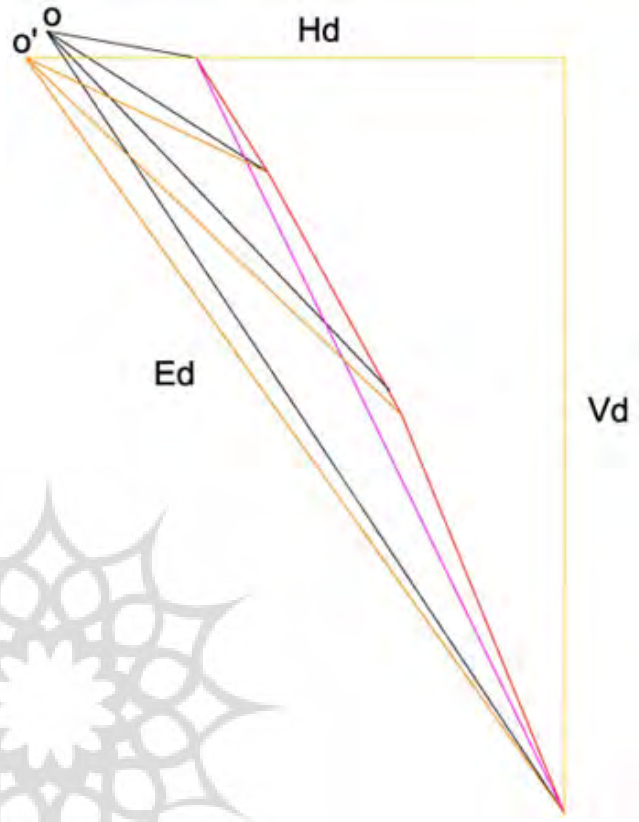

تصویر ۱۶: نیروی رانش حداقل و نقاط اثر آن در خیز و قوس درونی نیم‌طاق

برای به دست آوردن نیروی رانش در قوس قطری (Ed) از روش تقسیم دلخواه آن به تعدادی قوس متعامد در دو راستای افقی و قائم استفاده می‌شود. در مرحلهٔ نخست، نیروی رانش در هریک از این تقسیمات با تصویر کردن قوس متناظر هر تقسیم‌بندی به روشی مشابه آنچه توضیح داده شد، صورت می‌گیرد و در ادامه، با توجه به زاویهٔ ۴۵ این نیروها، نتیجه در کسینوس زاویه میان قطر و خط افقی و عمودی (در این مثال ۷۲/۲)، ضرب می‌شود تا مؤلفه‌های افقی و عمودی نیروهای رانش در هریک از قوس‌های تقسیم‌شده به دست آید (تصویر ۱۷).

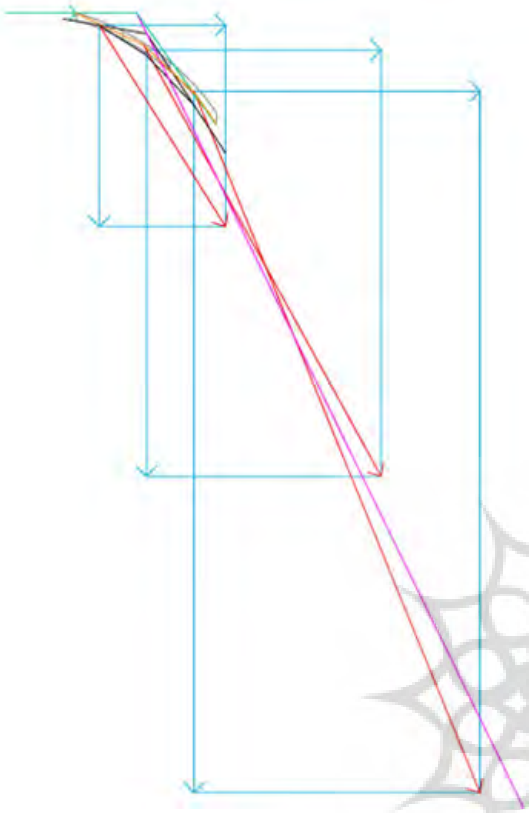



تصویر ۱۷: تقسیم‌بندی قوس متناظر قطر به قوس‌های طولی و عرضی

در مرحلهٔ بعد، به کمک رسم چندضلعی نیروها و نمودار فونیکولار، نیروی رانش قطری (Ed) محاسبه خواهد شد. بدین‌ترتیب که ابتدا مؤلفه‌های افقی و قائم هریک از تقسیمات قوس (خطوط آبی تصویر ۱۸) که در مرحلهٔ قبل حاصل شد، ترسیم شده تا برایندشان به دست آید (خطوط قرمز تصویر ۱۸). سپس با به دنبال هم قرار دادن بردارهای این برایندها، چندضلعی نیرو ترسیم می‌شود. از نقطه‌ای دلخواه به نام قطب (o) خطوطی به ابتدا و انتهای بردار این نیروها وصل می‌شود تا اولین نمودار آنتی فونیکولار (خلاف جهت فونیکولار و رو به پایین) با انتقال این خطوط به روی قوس اصلی به دست آید (خطوط سیاه‌رنگ تصاویر ۱۸ و ۱۹). از تقاطع دو امتداد اولین و آخرین خط انتقال‌یافته روی قوس با برایند نیروهایی که از چندضلعی نیروها به دست آمد و بر قوس اصلی منتقل شد، خطی حاصل می‌شود که مرکز ثقل قوس روی آن قرار دارد (خط بنفش‌رنگ تصویر ۱۸). حال با ترسیم نیروی رانش افقی مینیمم که در خیز قوس اثر می‌کند و تقاطع آن با این خط جدید، نقطه‌ای به دست می‌آید که از آن می‌توان به پای قوس درونی خطی رسم کرد تا راستای نیروی رانش در قوس به دست آید (خطوط سبزرنگ تصویر ۱۸). با انتقال این راستا به چندضلعی نیروها و تقاطعش با خط افقی (یعنی راستای نیروی رانش مینیمم)، در این چندضلعی قطب جدید (o') به دست می‌آید. اکنون مرحلهٔ قبل با ترسیم خطوطی به ابتدا و انتهای نیروها در چندضلعی نیروها تکرار شده و سپس، این خطوط مجدداً به روی قوس منتقل می‌شوند (خطوط نارنجی‌رنگ تصویر ۱۹). چنانچه کلیهٔ خطوط انتقال‌یافته درون ضخامت قوس قرار گیرند، نتیجهٔ مطلوب حاصل شده است و در غیر این صورت، فرایند جابه‌جایی محل قطب تکرار خواهد شد. در تصویر ۱۹ مقادیر مؤلفه‌های افقی و عمودی نیروی رانش (Hd) و (Vd) و همچنین برایند آن‌ها یعنی (Ed) قابل محاسبه است. تحلیل کامل نیروها در مقطعی از بنا شامل تعیین ادامهٔ مسیر نیروی رانش تا رسیدن آن به زمین و سپس، ارزیابی پایداری اجزای تکیه‌گاهی مانند جرزها یا پایه‌ها توسط عامل ضریب ایمنی خواهد بود. بدین‌ترتیب که در مثال فوق، حاصل‌جمع نیروهای رانش طاق یعنی Ew, El و Ed و نیروی وزن جرز (W) که بر مرکز ثقل آن وارد می‌شود، نیروهایی هستند که به تکیه‌گاه طاق وارد می‌شوند. با توجه به اینکه طاق دارای تعادل بوده، می‌توان با دانستن ضخامت جرز و به کمک معادلهٔ گشتاور حول نقطهٔ A، نقطهٔ اثر نیرو را در جرز به دست آورد (تصویر ۲۰). با داشتن مقدار (X)، می‌توان طبق رابطهٔ تصویر ۹، ضریب ایمنی هندسی را برای این جرز محاسبه کرد.



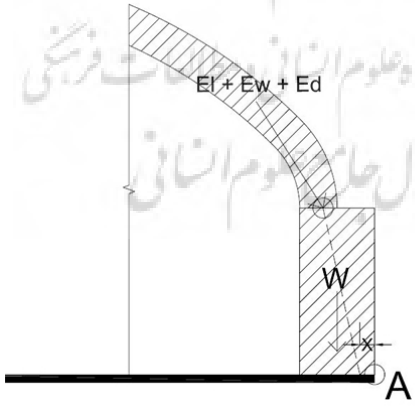

تصویر ۱۸: سمت چپ: نمودار آنتی فونیکولار قوس قطری



تصویر ۱۹: سمت راست: نمودار چندضلعی نیروهای قوس قطری

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

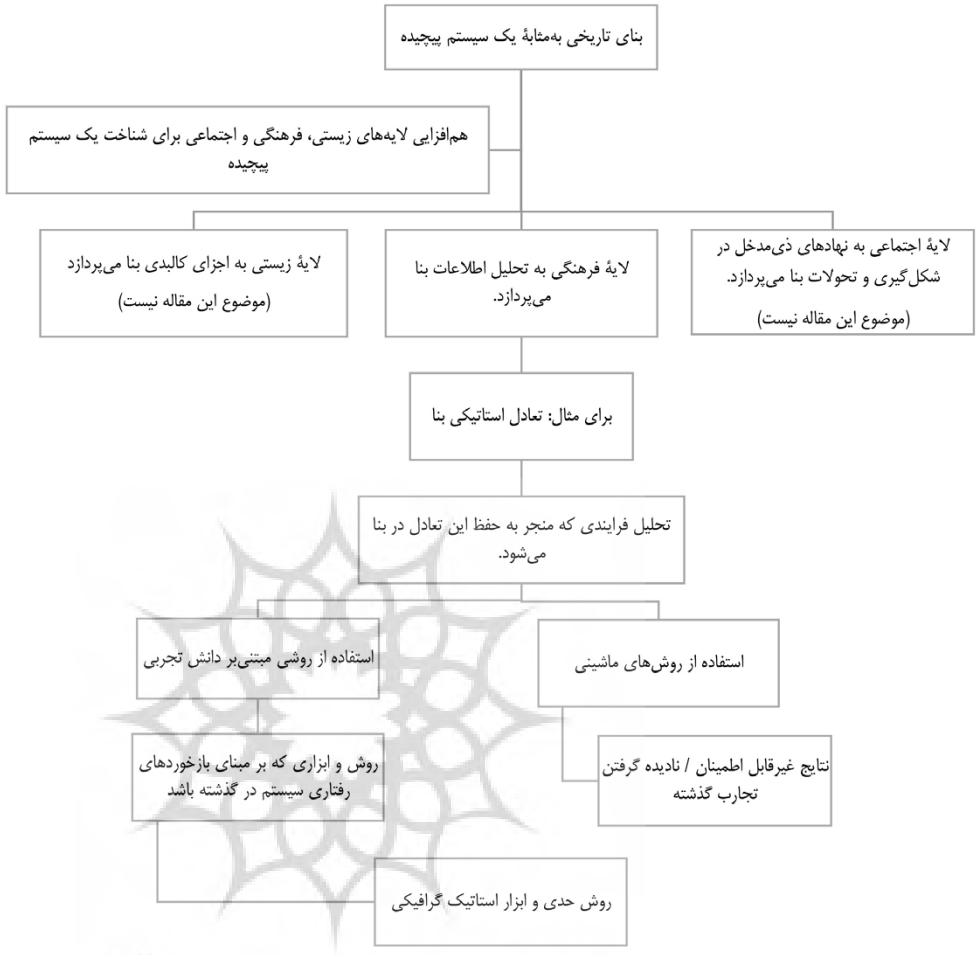





تصویر ۲۰: نیروهای وارد بر تکیه‌گاه طاق

## ٤. جمع‌بندی

در این مقاله تلاش شد تا با استفاده از یک چارچوب مفهومی که برگرفته از نظریهٔ سیستم‌های پیچیده است، روند تحلیل فرایند تعادل استاتیکی در یک جزء از بنای تاریخی مورد ارزیابی قرار گیرد. این رویه در نمودار زیر نشان داده شده است.




نمودار ۱: نگرش سیستمی در بررسی فرایند تعادل استاتیکی بنا



برای این منظور نخست، نگاهِ نظریهٔ فوق به شناخت لایه‌لایه از یک بنای تاریخی و چگونگی بررسی فرایندها در هر لایه توضیح داده شد. سپس، الگویِ رفتار در هر سیستم با توجه به ماهیت آن سیستم تبیین شد. موضوع این مقاله صرفاً به لایهٔ فرهنگی و تحلیل اطلاعات در فرایند حفظِ تعادل استاتیکی بنا مربوط می‌شود و توجه به این نکته ضروری است که در نگرش سیستمی، نقشهٔ راهی برای پیش‌بینیِ رفتار در یک سیستم پیچیده مشخص می‌شود نه روش و ابزار برای پیش‌بینی. برای نمونه، برای تحلیلِ موضوع تعادلِ استاتیکی در یک بنای تاریخی که در این مقاله بدان پرداخته شده است، چنانچه از ابزارهای ماشینی استفاده شود، نه نتایج قابل اطمینانی حاصل نمی‌شود و نه دانش تجربیِ موجود در این زمینه لحاظ می‌شود. لذا شیوهٔ مناسب‌تر، روشی مبتنی‌بر بازخوردهای رفتاری موضوع موردِ مطالعه (تعادل) در گذشته می‌تواند باشد. پس از بررسی تجربیات گذشتگان به موضوع تعادل در بناهای تاریخی نتیجه‌گیری شد که ارزیابی یک فرایند اطلاعات‌محور در قالب بررسیِ مسیر انتقالِ نیروی رانش به زمین می‌تواند با استفاده از روش حدی و ابزار استاتیک گرافیکی، شیوه‌ای مطلوب باشد؛ زیرا این روش قادر است ویژگی‌های سیستمی ازجمله رفتار غیرخطی، برهم‌کنش میان اجزا و سازگاری (در قالب بروز الگویی مشخص از ترک) را در پیش‌بینی رفتار بنای تاریخی نشان دهد (جدول ۱). شیوهٔ مذکور با پیشنهاد تعمیم بر همهٔ اجزای بناهای تاریخی ایران، در این مقاله بر روی یک طاق چهاربخش مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱: توضیح ویژگی‌های سیستم رفتار بنا با استفاده از روش حدی

| نظریهٔ سیستم‌های پیچیده | روش حدی با ابزار استاتیک گرافیکی |
|---|---|
| نگرشی کل‌نگر | ارزیابی وضعیت تعادل در کل بنا |
| برهم‌کنش میان اجزا | مسیر حرکت نیروی رانش در اجزای ساختاریِ هر مقطعی از بنا |
| رفتار غیرخطی | این روش، نقاط آستانه فروپاشی را که در آن‌ها رفتار بنا می‌تواند به‌صورت ناگهانی تغییر کند، نشان می‌دهد. |
| تطبیق‌پذیری | وجود مسیرهای متعدد برای حرکت نیروی رانش و همچنین، باز و بسته شدن ترک‌های اجزا در پاسخ به تهاجمات محیطی |
| هم‌افزایی | تضمین تعادل در بنا با مجموع عناصری که ممکن است هریک به‌تنهایی تعادل نداشته باشند. |
| ظهور | بروز مکانیسم (فروپاشی) در بنا که از تعاملات موضعیِ هندسهٔ اجزای بنا ناشی می‌شود. |

## نتیجه

به کمک نظریهٔ سیستم‌های پیچیده می‌توان چارچوبی برای شناخت یک بنای تاریخی و تحلیل رفتار آن ارائه داد. این چارچوب سه لایه برای شناخت موضوع پیشنهاد می‌کند و در تحلیلِ الگوی رفتاری موضوع، با فرایندهای هر لایه سروکار دارد. از هم‌افزایی الگوهای رفتاری در لایه‌ها، رفتار کل سیستم پیش‌بینی‌پذیر می‌شود. در لایهٔ اطلاعات‌محور فرهنگی، فرایند تعادل در بنا به کمک زنجیره‌ای از کارکردهای متصل به یکدیگر محقق می‌شود که طی آن، وزن اجزای ساختاری با هدف ایستایی بنا به زمین منتقل می‌شود. بررسی سیر تاریخی تحلیل این بناها نشان می‌دهد که از ترکیب روش پیشنهادی توسط ژاک هیمن و استاتیک گرافیکی، می‌توان روشی مؤثر برای تحلیلِ سیستمیِ فرایند تعادل در اجزای ساختاری بنای تاریخی به دست داد. این روش، برای تحلیل استاتیکی سیستم رفتار بنا، شرایطی مفروض است؛ ازجمله اینکه سیستم بنا ازطریق نیروهای فشاری، بار ثقلی اجزای خود را منتقل می‌کند، تنش‌های کششی در آن ناچیز بوده و درنتیجه قابل صرف‌نظر کردن هستند و نیز، نیروی اصطکاک میان بلوک‌های تشکیل‌دهندهٔ ساختار بنا (سنگ، آجر، خشت) از لغزش آن‌ها جلوگیری می‌کند. لذا می‌توان رفتار یک بنا را با بررسی برهم‌کنش میان اجزای آن از منظر مسیر نیروی رانش درون آن‌ها انجام داد، به آسیب ترک در اجزای بنا در قالب ویژگی سازگاری و انطباق‌پذیری این اجزا با تهاجماتِ محیطی نگریست، وضعیت کلی تعادل بنا را ارزیابی کرد و همچنین، خطرات احتمالی فروپاشی آن را در آینده پیش‌بینی کرد. بنابراین، تبیین مفهوم پیچیدگی در رفتار یک بنای تاریخی لزوماً با به‌کارگیری ابزارهای پیچیده محقق نمی‌شود و به‌جای استفاده از مدل‌سازی‌های عددی و پیشرفته حتی می‌تواند در قالب استفاده از الگوهایی ساده اما کارآمد هم توضیح داده شود. الگوهایی که انباشتگیِ تجربیات گذشته را دارا هستند. در راستای کاربست عملی این چارچوب، نیمی از مقطعی از یک طاق چهاربخش، برای نمونه، موضوع تحلیل قرار گرفت. با مشخص کردن تویزه‌های اصلی باربر در طاق و مؤلفه‌های افقی و قائم نیروی رانش در هریک از آن‌ها، نمودار آنتی فونیکولار و چندضلعی نیروها رسم شد و نقطهٔ اثر ورود نیروی رانش طاق به جرز، نقطه‌ای با فاصلهٔ X از انتهای جرز در نظر گرفته شد. به کمک معادل تعادل گشتاور مقدار X محاسبه شد و ضریب ایمنی هندسی برای جرز به دست آمد. قابل ذکر است که تحقق یک تحلیل سیستمی محدود به روش و ابزار ارائه‌شده در این مقاله نبوده و چنانچه بر پایهٔ فرضیات هیمن تحقیقات گسترده‌ای درزمینهٔ توسعهٔ ابزارهایی مانند تحلیل‌های سه‌بعدی و شبکه‌ای[۳۵] به روی بناهای با مصالح بنایی صورت گرفته است، تبیین این روش‌ها و پیاده‌سازی آن‌ها بر روی بناهای تاریخی می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی در این زمینه باشد.

## پی‌نوشت‌ها

1. Leonardo Da Vinci
2. Galilei
3. Simon Stevin
4. Robert Hooke
5. Gregory
6. Joint of Rupture
7. La Hire
8. Bélidor
9. Couplet
10. Coulomb
11. Audoy
12. Gertsner
13. Moseley
14. Mery
15. Poncelet
16. Winkler
17. Rankine
18. Culmann
19. Funicular
20. Swain
21. Graphical Analysis
22. Giancarlo Cataldi

۲۳. مقالهٔ «نظریهٔ سیستم‌های پیچیده؛ رویکردی کل‌نگر در حفاظت از میراث معماری و شهری» است که در فصلنامهٔ علمی *مرمت و معماری ایران* به‌صورت آنلاین به چاپ رسیده است.

24. Talcott Parsons
25. The structure of social action
26. Stevin
27. Varignon
28. Monge
29. Bresse
30. Ritter
31. Cremona
32. Zalewski
33. Allen
34. Form and Forces
35. Thrust Network Analysis

## منابع


- ارکانی، کیارش، و حامد حمیدی. ۱۴۰۱. بررسی لرزه‌ای سازهٔ طراحی‌شده با روش استاتیک گرافیکی. بابل: *نهمین کنفرانس ملی مصالح و سازه‌های نوین در مهندسی عمران.*
- ایزدپناه، فرزین. ۱۳۹۳الف. تحلیل خط فشار: پیشینه و دستاوردهای جدید. تبریز: *همایش ملی معماری، عمران و توسعهٔ نوین شهری.*
- ایزدپناه، فرزین. ۱۳۹۳ب. مفهوم محدودهٔ ایمنی سازه‌ای در بناهای طاقی تاریخی. تهران: *دومین همایش ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری.*
- ایزدپناه، فرزین، و سروناز سرداری. ۱۳۹۹. تحلیل پایداری لرزه‌ای سه قوس ایرانی. مجلهٔ *مطالعات معماری ایران* ۱۰ (۱۷): ۱۴۳ـ۱۶۳.
- خزائلی، پویا، و بهناز مترجم. ۱۴۰۲. *محاسبهٔ ترسیمی قوس بنایی*. مشهد: کتابکدهٔ کسری.
- صباغیان، طاها، و سید مصطفی مختاباد امرئی. ۱۴۰۱. مطالعات تطبیقی روش گرافیک استاتیک در محاسبات سازه‌ای. گرگان: *دومین کنفرانس ملی مهندسی عمران، توسعهٔ هوشمند و سیستم‌های پایدار.*
- محمدی چابکی، رضا. ۱۳۹۲. مؤلفه‌های پارادایم پیچیدگی. *روش‌شناسی علوم انسانی* ۱۹ (۷۶): ۶۱ـ۸۹.
- معماریان، غلامحسین. ۱۳۶۷. *نیارش سازه‌های طاقی در معماری اسلامی ایران*. تهران: جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت ایران.
- وکیلی، شروین. ۱۳۹۸. *نظریهٔ سیستم‌های پیچیده*. تهران: شورآفرین.
- Aita, D. 2023. Graphical Statics. In *Discrete Computational Mechanics of Masonry Structures, 21-93. Cham: Springer Nature Switzerland.*
- Allen, E., & W. Zalewski. 2009. *Form and Forces: designing efficient, expressive structures*. John Wiley & Sons.
- Blasi, Carlo. 2016. The Relationship Between the Project of Restoration and Project Structural Strengthening. *Quaderni di assorestauro* 3 (5): 8-17.
- Block, P., M. DeJong, & J. Ochsendorf. 2006. As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches. In *Nexus Network Journal* (pp. 13-24). Birkhäuser Basel.
- Belidor, B.F. 1729. *La Science des Ingenieurs dans la Conduite des Travaux de Fortification et Architecture Civile*. Paris: Claude Jombert.
- Benvenuto, E. 1981. *La Scienza delle Costruzioni e il suo Sviluppo Storico*. Sansoni, Firenze (rpt. 2006, Edizioni di Storia e Letteratura).
- Benvenuto, E. 1991. *An Introduction to the History of Structural Mechanics*. Springer.
- Coulomb, C.A. 1773. Essai sur une Application des Regles de Maximis et Minimis a Quelques Problemes de Statique Relatifs a l'Architecture. *Memoires de Mathematique et de Physique, presents a l'Academie Royale des Sciences* par Divers Savants et lus dans ses Assemblees (Paris), 7: 343_382.
- Couplet, P. 1730. Seconde Partie de l'Examen de la Poussee des Voutes. *Memoires de l'Academie Royale des Sciences* de Paris, 117_141.
- Culmann, K. 1866. *Die graphische Statik*. Meyer & Zeller, Zürich.
- De Domenico, M., D. Brockmann, C. Q. Camargo, C. Gershenson, D. Goldsmith, S. Jeschonnek, ... & H. Sayama. 2019. *Complexity explained*. Available online at https://complexityexplained.github.io (accessed May 16, 2022).

- Foce, F. 2005. On the Safety of the Masonry Arch: Different Formulations from the History of Structural Mechanics. In S. Huerta (Ed.), Essays in the History of the Theory of Structures, in honour of Jacques Heyman (pp. 117-142). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Gregory, D. 1697. Catenaria. *Philosophical Transactions of the Royal Society,* 19: 637-652.
- Heyman, J. 1966. The Stone Skeleton. *International Journal of solids and structures,* 2 (2): 249-279.
- Heyman, J. 1972. *Coulomb's Memoir on Statics: An Essay in the History of Civil Engineering*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Heyman, J. 1995. *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture.* Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Hooke, R. 1676 [sic 1675]. A Description of Helioscopes, and Some Other Instruments. London: J. Martyn.
- Huerta Fernández, S. 2001. Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach. *Historical Constructions. Possibilities of Numerical and Experimental Techniques.* Available online at https://oa.upm.es/569/ (accessed March 15. 2022).
- Huerta Fernández, S. 2005.The Use of Simple Models in the Teaching of the Essentials of Masonry Arch Behaviour. In book: *Theory and Practice of Constructions: knowledge, means and models. Didactis and research experiences*
- Huerta Fernández, S. 2008. The Analysis of Masonry Architecture: A historical Approach: To the memory of professor Henry J. Cowan. *Architectural Science Review*, 51 (4): 297-328.
- Huerta, S. 2010. The Safety of Masonry Buttresses. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering History and Heritage 163.1: 3-24.
- ICOMOS. 1993. Guidelines for Education and Training in the Conservation of Monuments, Ensembles and Sites.
- La Hire, P. 1695. Traite de Mechanique. Paris: Imprimirie Royal.
- La Hire, P. 1712. Sur la Construction des Voutes dans les Edifices. *Memoires de l'Academie Royale des Sciences de Paris,* 70-78.
- Maurer, B. 1998. *Karl Culmann und die Graphische Statik.* Diepholz: Verlag fur Geschichte der Naturwissenschaft und der Technik.
- Moseley, H. 1843. *The Mechanical Principles of Engineering and Architecture.* London: Longman, Brown, Green and Longmans.
- Paulino, Glacio H. 2016. Structural Design Optimization, Stanford Bulletin explore Courses. Stanford University.
- Poncelet, J.V. 1852. Examen Critique et Historique des Principales Theories ou Solutions Concernant l'Equilibre des Voutes. *Comptesrendus de l'Academie des Sciences* (Paris) 35(17): 494-502, 531-540, 577-587.
- Rankine, W.J.M. 1858. *A Manual of Applied Mechanics*. London: Charles Griffin.
- Sinopoli, A. 2012. *Origine e Sviluppi della Statica Grafica*. In T. Levi Civita & U. Amaldi (Eds.), Complementi alle Lezioni di Meccanica Razionale, CompoMat, 161-185.

- Ungewitter, G.G., & K. Mohrmann. 1890. *Lehrbuch Der Gotischen Konstruktionen*. Edited by T.O. Weigel Nachf. 3rd ed. Leipzig.
- Winkler, E. 1879-80. *Die Lage der Stutzlinie im Gewolbe*. Deutsche Bauzeitung, 13 & 14: 117-119, 127-128, 130 (1879); 58-60 (1880).
- Wolfe, W. S. 1921. *Graphical Analysis: a text book on graphic statics*. McGraw-Hill book Company, Incorporated.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

# Systemic Analysis of the Equilibrium Process in the Structural Components of Historical Buildings (Case Study: Graphical Analysis of a Quadrilateral Vault)

**Nima Keynejad**
Ph.D. Researcher, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran.

**Mohammad Hassan Talebian**
Professor, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran.

**Saeid Khaghani**
Assistant Professor, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran.

The behavior of historical buildings is not easily predictable, and one way to better understand this behavior is to consider it as a complex system. Complex systems theory examines phenomena layer by layer and focuses on the relationships between information. Each layer of the system exhibits a specific behavioral pattern, and the behavior of the whole system becomes predictable through the synergy between these layers. From the perspective of this theory, behavior in a historical building encompassed a more comprehensive concept and included the structure. On the other hand, the history of structural analysis in historical buildings highlighted the importance of geometry in maintaining the building's equilibrium. At the same time, machine tools that are common today use other principles in their analyses and do not provide reliable results due to their simplistic assumptions. As a result of introducing a conceptual framework for understanding a historical building based on the theory of complex systems in this article, it is argued that the analysis of behavior in a historical building depends both on the examination of the processes occurring in different layers of the building, and on the application of empirical knowledge. As a result of examining historical equilibrium analysis in historical buildings, it is concluded that combining the limit method with graphical statics enables the determination of a building's structural elements' complexity through an information-driven process, based on the path of the thrust force. This descriptive-analytical article presented its proposal practically by implementing this method on a Quadrilateral vault as a component of a historical building.

**Keywords:** Systemic Analysis, Complex System Theory, Equilibrium Process, Graphical Analysis, Quadrilateral Vault.