

## تحلیل پایداری لرزه‌ای سه قوس ایرانی

فرزین ایزدپناه\*

سروناز سرداری\*\*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸

### چکیده

بررسی پایداری سازه‌های تاقی یکی از مسائل مورد توجه برای مرمت بناهای تاریخی، پایدارسازی و طراحی سازه‌های بومی و روستایی است. این نوشتار، در این راستا، به تعیین و مقایسه حد نهایی پایداری سه قوس مشهور ایرانی، قوس تخم‌مرغی، قوس مربع (پاتو پل- نیزه‌ای) و قوس پنج و هفت تند در برابر زلزله می‌پردازد. مقاله با روش تجربی و با استفاده از تحلیل هندسی و مدل‌سازی فیزیکی در جست‌وجوی پاسخ این پرسش است که حد نهایی پایداری لرزه‌ای این سه قوس به چه میزان است؟ بررسی قوس‌ها برای نسبت ضخامت به دهانه‌های متفاوت، در چهارچوب تحلیل حد نهایی، با روش تحلیل خط رانش با استفاده از مدل‌های پارامتریکی که امکان بررسی سریع و دقیق را فراهم می‌کنند، انجام می‌گیرد و نتایج حاصل از آن با فروریختگی مدل فیزیکی قوس‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نسبت ضخامت به دهانه قوس‌ها، پایداری لرزه‌ای آن‌ها افزایش می‌یابد. و با کاهش خیز قوس‌های نمونه نسبت به یکدیگر، پایداری لرزه‌ای آن‌ها افزایش می‌یابد. آزمایش مدل‌های فیزیکی نیز این امر را تأیید کرده، اما نشان می‌دهد حد پایداری لرزه‌ای مدل فیزیکی از حد حاصل از روش تحلیلی کمتر است و بنابراین، ضخامت مؤثر قوس‌ها، در واقعیت، قابل اتکا می‌باشند. این نوشتار ضمن ارائه پاسخ به یک مسئله کاربردی، در فرایند مقایسه قوس‌ها، بینشی را درباره رفتار سازه‌ای آن‌ها فراهم می‌آورد.

### کلیدواژه‌ها:

فروریختگی قوس‌های ایرانی، تحلیل لرزه‌ای، تحلیل در حالت حد نهایی، تحلیل خط رانش.

\* مربی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، نویسنده مسئول، fzizadpanah@yahoo.com  
\*\* کارشناس معماری، دانشگاه شهید باهنر کرمان

## پرسش‌های پژوهش

۱. حد نهایی پایداری لرزه‌ای سه قوس انتخابی ایرانی برای نسبت ضخامت به دهانه‌های متفاوت چقدر است؟
۲. از تحلیل حد نهایی این قوس‌ها، چه بینشی درباره رفتار قوس‌های ایرانی فراهم می‌آید؟

### مقدمه

پرداختن به تحلیل سازه‌های تاریخی یکی از مسائل سازه‌ای حائز اهمیت است. سازه‌های تاریخی دارای ارزش‌های فرهنگی و اقتصادی هستند و از سوی دیگر زندگی در بسیاری از این بناها جریان دارد و توجه به ایمنی ساکنان آن‌ها ضروری است. از این رو توجه ویژه به این مسئله ضروری است. بررسی فروریختگی قوس‌ها در اثر زلزله، یکی از مسائل پایه در تحلیل سازه‌های تاریخی است. بررسی این موضوع می‌تواند به‌طور مستقیم برای بررسی فروریختگی تاق آهنگ به کار رود. همچنین، مفاهیم نهفته در آن می‌توانند برای بررسی سایر مسائل پیچیده‌تر در این حوزه مورد توجه قرار گیرند. بررسی این مسئله، علاوه بر کاربرد در آسیب‌شناسی بناهای تاریخی، می‌تواند در مقاوم‌سازی و طراحی سازه‌های روستایی نیز مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اهمیت این مبحث و همچنین به‌منظور گسترش کاربرد روش تحلیل هندسی برای قوس‌های ایرانی، این نوشتار به شرح و تحلیل رفتار لرزه‌ای سه قوس ایرانی می‌پردازد.

### ۱. روش تحقیق و مراحل انجام پروژه

روش این پژوهش تحلیل ریاضی و تجربی است. این نوشتار، در چهارچوب تحلیل حد نهایی<sup>۱</sup>، بر اساس فرضیه‌های هیمن، به بررسی مدل پارامتریک سه قوس ایرانی، در نرم‌افزار کبری<sup>۲</sup>، با استفاده از خط رانش<sup>۳</sup> می‌پردازد و نتایج تحلیل‌های هندسی با نتایج حاصل از مدل فیزیکی مقایسه و بحث می‌گردند. برای بررسی پایداری قوس‌ها در برابر نیروی زلزله وارد در صفحه آن‌ها، از روش دوران صفحه زمین<sup>۴</sup> (معادل دوران خط نیرو<sup>۵</sup> تحت اثر نیروی جانبی) استفاده می‌شود. پس از ترسیم قوس‌ها و خط رانش، «حداقل ضخامت مورد نیاز برای قرارگیری یک خط رانش درون قوس» که نقطه شروع تحلیل است، تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از یک مدل نرم‌افزاری، که امکان تبادل دوسویه اطلاعات<sup>۶</sup> را فراهم می‌آورد، میزان شتاب افقی لازم برای فروریختگی هر یک از قوس‌ها تحت اثر نیروی زلزله، برای نسبت‌های مختلف ضخامت به دهانه استخراج می‌شود. از مدل‌های فیزیکی برای ارزیابی نتایج تحلیل هندسی استفاده می‌شود. نسبت ضخامت به دهانه‌های دو مدل فیزیکی ۱/۱۰ و ۲/۱۰ می‌باشند. تأثیر تغییر ضخامت یک قوس و تفاوت خیز قوس‌ها نسبت به یکدیگر، در پایداری لرزه‌ای نیز، در این نوشتار مورد بحث قرار می‌گیرد. روش در مسیر تحلیل قوس‌ها با دقت بیشتری تشریح می‌شود.

### ۲. پیشینه پژوهش

تحلیل سازه‌های تاقی تاریخی به دلیل تفاوت رفتار آن‌ها با سازه‌های جدید، مانند فولاد و بتن مسلح، مسئله‌ای متفاوت در تحلیل سازه است. این نوشتار تحلیل در حالت حد نهایی (روش تحلیل پلاستیک<sup>۷</sup>) را به‌عنوان نظریه پایه مورد توجه قرار می‌دهد و پیشینه پژوهشی را در این حوزه بررسی می‌کند. «بوثنای» (Boothby 2001) قید می‌کند که روش پلاستیک، که نخستین بار توسط هیمن برای تحلیل سازه‌های سنتی به کار برده شد، روشی خلاقانه برای فهم رفتار این سازه‌هاست. گرچه، بوثنای در کنار این روش، روش‌هایی چون اجزای محدود<sup>۸</sup> و روش اجزای منفرد<sup>۹</sup> را برمی‌شمرد، روش تحلیل پلاستیک را دروازه ورود به فهم سازه‌های تاریخی در بستر آکادمیک جدید معرفی می‌کند.

با توجه به حوزه نظری نوشتار، بررسی پیشینه، محدود به پژوهش‌هایی در حوزه تحلیل حد نهایی هستند که بر اساس فرض‌های هیمن انجام پذیرفته‌اند (فرض‌ها در ادامه طرح خواهند شد).

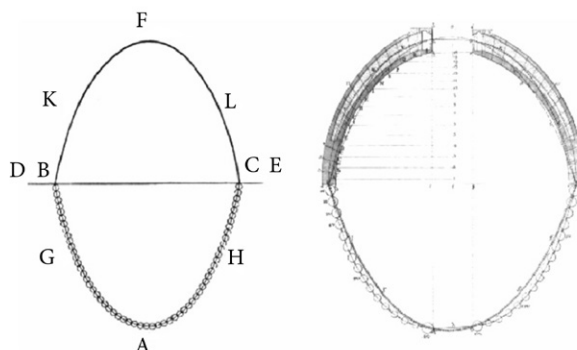
روش تحلیل حد نهایی به‌صورت ضمنی در روش استادکاران سنتی و طراحان رنسانس حضور داشته است. این روش تحلیل ریشه در بینش هندسی استادکاران سنتی، یعنی طراحی با «رویکرد مبتنی بر تعادل»<sup>۱۰</sup> داشته و بعد از

رسانس، رفته‌رفته، به شکل نظری تدوین شده است: استادکاران سنتی سازه‌هایی طراحی می‌کرده‌اند که با وجود تسلیم و ترک‌خوردگی در نقاطی، یعنی عبور از حد الاستیک در آن نقاط، پایدار می‌مانده‌اند. همین که خود از مبدعان تحلیل و طرح پلاستیک سازه‌های فولادی بوده (نک: بیکر و هیمن ۱۳۹۱)، نخستین بار این رویکرد استادکاران را در چهارچوب نظری «تحلیل حد نهایی» در محیط دانشگاهی بیان کرده است (نک: Heyman 1966؛ هیمن ۱۳۷۳).

همین نخستین بار، به بررسی مسائل سازه‌های گوتیک با این روش پرداخته و برای مثال، حداقل ضخامت مورد نیاز برای آغاز تحلیل را برای قوس‌هایی که کمانی از دایره هستند، استخراج کرده است. کلمنته (Clemente 1998) با روش کار مجازی<sup>۱۱</sup> به بررسی حد پایداری قوس‌ها در زلزله در این چهارچوب نظری پرداخته است. اوشندورف (Ochsendorf 2005) بر اساس مطالعات هیمن (1966) و به‌طور خاص روش کلمنته، حد پایداری لرزه‌ای قوس‌های کمان دایره و ترکیب پایه و این قوس‌ها را بسط داده است: وی نیز از «روش کار مجازی» در این مسیر بهره برده است. او نتایج تحلیل را برای قوس‌های کمان دایره با خیزها، و نسبت‌های ضخامت به دهانه متفاوت استخراج کرده است.

تحلیل خط رانش<sup>۱۲</sup> (یا تحلیل با چندضلعی فونیکولار<sup>۱۳</sup>) یکی از نخستین روش‌های تحلیل سازه‌های سنتی است که در ابتدای شکل‌گیری، سازه را در حد نهایی الاستیک (بدون ترک‌خوردگی مقطع) مورد توجه قرار می‌داد. طراح - مهندسانی چون داوینچی برای طراحی گنبدها از آن استفاده می‌کردند. اما نخستین بار رابرت هوک آن را به‌صورت نظری بیان کرد (Block, De Jong, and Ochsendorf 2006) (تصویر ۱). پس از آن، تحقیقات زیادی در تحلیل قوس‌ها با این روش انجام شده‌اند. برای مثال، مری (Mery 1840) قوس ایمن را قوسی می‌داند که خط رانش در تمام قوس، در یک‌سوم مقطع آن قرار گیرد. تحلیل الاستیک با این روش در منابع غربی (مانند چینی ۱۳۸۳)، و در منابع داخلی (مانند حیدری ۱۳۸۱؛ ایمانی ۱۳۷۸) مورد توجه بوده است. ایزدپناه (۱۳۹۳) ب) سیر تحول روش تحلیل خط رانش را به‌تفصیل بیان کرده است. این روش در نیمه دوم قرن بیستم، توسط تحقیقات هیمن به تحلیل پلاستیک سازه‌ها متصل شد (Heyman 1966).

برای تحلیل در حالت حد نهایی با روش خط فشار، دی جونگ (De Jong 2009) و بلاک و دیگران (Block, De Jong, and Ochsendorf 2006) به توسعه مدل‌های پارامتریک رایانه‌ای خط رانش پرداخته‌اند و امکان تحلیل سریع گروهی از سازه‌های مشابه را فراهم کرده‌اند. رومانو (Romano 2005) برای بررسی شکست قوس‌های تیزدار گوتیک بر اثر حرکت پایه، از این روش بهره برده است. به‌طور خاص، دی جونگ امکان حل ترسیمی مسئله پایداری لرزه‌ای قوس‌ها با خط رانش را به‌جای استفاده از روش کار مجازی فراهم آورده است (De Jong 2009). ایزدپناه (۱۳۹۳) الف) از این روش برای بررسی لرزه‌ای سه قوس ایرانی استفاده کرده است؛ هرچند نتایج آن تنها برای یک قوس با نسبت ضخامت به دهانه مشخص هستند. شاپیرو (Shapiro 2010) به بررسی رفتار مدل‌های کوچک مقیاس تاق‌های آهنگ با قوس‌های کمان دایره در زلزله می‌پردازد و نتایج تحلیل را با پاسخ‌های تحلیلی دی جونگ مقایسه می‌کند. نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی وی، لزوم توجه به ضخامت مؤثر قوس<sup>۱۵</sup> در تحلیل رانش را که دی جونگ و دیگران (De Jong, De Lorenzis, and Adams 2008) بدان اشاره داشته، مؤکد می‌نماید.

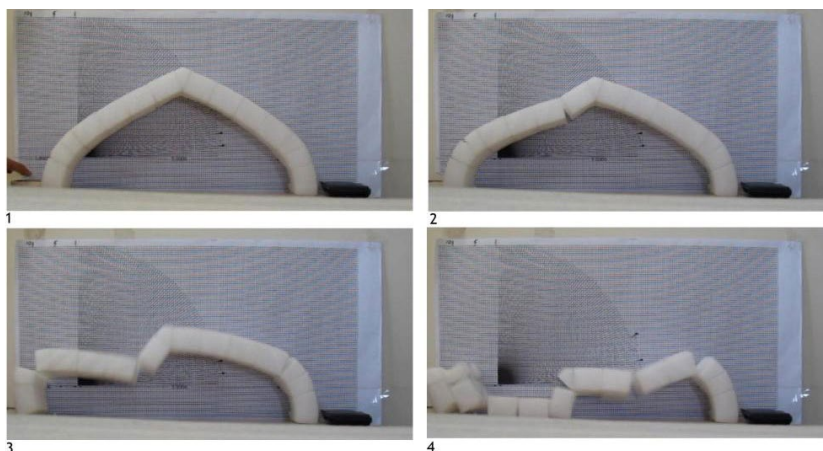


تصویر ۱: چپ: ترسیم پولنی از مقایسه هوک بین یک قوس و زنجیر آویخته. راست: تحلیل وی از گنبد سنت - پیتر در رم (۱۷۴۸) (Block, De Jong, and Ochsendorf 2006) (برای خوانایی، نوشته‌های روی تصویر هوک توسط نگارندگان بازنوشته شده‌اند).

### ۳. مبانی نظری

تحلیل در حالت حد نهایی، با پذیرفتن امکان تسلیم<sup>۱۶</sup> در نقاطی از سازه، بدون نیاز به بررسی تمام تاریخچه بارگذاری سازه، هدف نهایی خود را متوجه بررسی بار فروریختگی<sup>۱۷</sup> سازه می‌کند (بیکر و هیمن ۱۳۹۱). این روش برای تحلیل سازه‌های قابی ابداع گردید و همان گونه که اشاره شد، هیمن (1966) این روش را به بررسی سازه‌های سنتی تعمیم داد. این روش به‌ویژه در سازه‌های سنتی که معیارهای تحلیل خاص خود را دارند، حائز اهمیت است: درحالی که مسئله سازه‌های جدید مقاومت<sup>۱۸</sup>، تغییر شکل الاستیک اعضا مثلاً تیرها در خمش<sup>۱۹</sup> و پایداری<sup>۲۰</sup> هستند، مسئله سازه‌های سنتی، در عمل، تنها، پایداری است (Huerta 2001). با توجه به اینکه پایداری این بناها اصولاً مقوله‌ای هندسی است، تحلیل آن‌ها عموماً به هندسه ارجاع می‌یابد: آنچه چهارچوب نظری تحلیل حدی با خط رانش را شکل می‌دهد. این شیوه تحلیل بر سه فرض استوار است که به فرض‌های هیمن منسوب هستند (Block, De Jong, and Ochsendorf 2006):

- مصالح بنایی مقاومت فشاری زیادی دارند؛
  - مصالح بنایی مقاومت کششی ناچیزی دارند و می‌توان آن را صفر فرض نمود؛
  - اصطکاک بین بلوک‌های صلب مصالح سنتی برای جلوگیری از لغزش<sup>۲۱</sup> مصالح کافی است.
- با این فرض‌ها، سازه به‌صورت مدلی از بلوک‌های صلب درمی‌آید که بر روی هم چیده شده‌اند: مسئله تحلیل به بررسی پایداری توده‌ای از بلوک‌های صلب بر روی هم چیده شده منتهی می‌گردد.
- دو قضیه پایه در این شیوه تحلیل مورد توجه هستند که توسط بیکر و هیمن (۱۳۹۱) بیان شده‌اند:
- قضیه حد پایین<sup>۲۲</sup>: چنانچه تنها یک مسیر نیرو در سازه وجود داشته باشد که نیروها به‌صورت ایمن منتقل گردند، حتی اگر این مسیر توسط تحلیلگر قابل تشخیص نباشد (نامعینی سازه)، سازه پایدار است؛ یا به تعبیر دیگر، چنانچه یک مسیر نیرو توسط تحلیلگر قابل تشخیص باشد که سازه بتواند با آن پایدار باشد، سازه از آن مسیر نیرو یا از مسیر نیروی دیگری پایداری خود را حفظ می‌کند (تصویر ۲ تعبیر فیزیکی این قضیه را در تحلیل پایداری قوس بر اساس جابه‌جایی پایه آن<sup>۲۳</sup> نشان می‌دهد).
  - قضیه حد بالا<sup>۲۴</sup>: چنانچه تنها یک مسیر نیرو در سازه وجود داشته باشد و همان یک مسیر هم موجب تبدیل سازه به یک نوع مکانیسم فروریختگی گردد، این مسیر حد نهایی پایداری سازه را نشان می‌دهد (تصویر ۲).

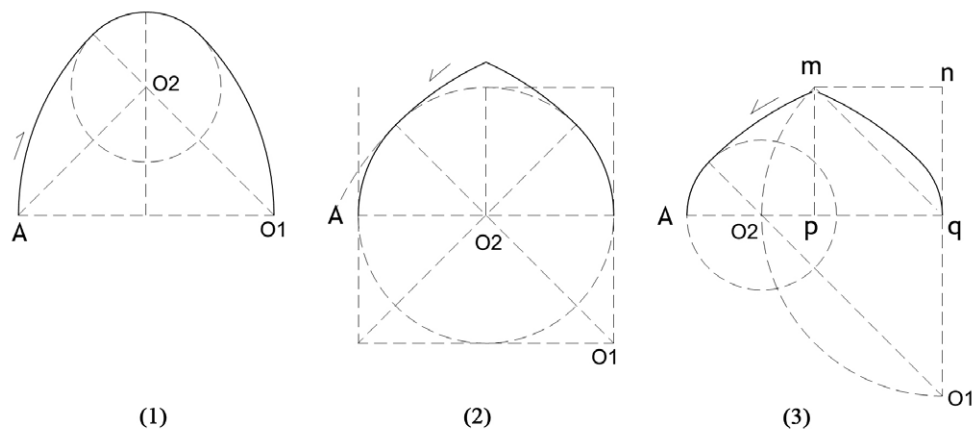


تصویر ۲: تحلیل پایداری قوس به روش تحلیل در حالت حد نهایی، بر اثر جابه‌جایی پایه قوس. قوس از بلوک‌های صلب که در تعادل با یکدیگر هستند، تشکیل شده است. (۱) تعبیر فیزیکی قضیه حد پایین: قوس ایرانی در تعادل اولیه، مسیر نیرو در آن مشخص نیست (سازه نامعین). (۲) حرکت پایه و تشکیل سه مفصل در قوس و قرارگیری سازه در وضعیت معین. (۳) تشکیل مفصل چهارم. یک مسیر نیرو در سازه مشخص است، اما این مسیر منجر به مکانیسم فروریختگی چهارمیله‌ای می‌گردد. (۴) فروریختگی قوس (ساخت مدل: صالح ستاری).

مسئله کلیدی دیگر مقیاس‌پذیری<sup>۲۵</sup> تحلیل و طراحی مبتنی بر پایداری است. هورتا بررسی کرده است که چگونه دیدگاه گالیه درباره مقیاس‌ناپذیری تحلیل و طراحی مسائل مربوط به مقاومت مصالح (قانون توان دوم - توان سوم)، در واقعیت، به سازه‌های بنایی تاریخی که مسئله آن‌ها پایداری است، نامربوط می‌باشد (Huerta 2006). ایزدپناه (۱۳۹۷) به امکان استفاده از طومارهای «بی‌مقیاس» در معماری ایران، به دلیل طراحی مبتنی بر پایداری اشاره می‌کند. هورتا تاریخ مبانی نظری این بحث را به تفصیل نقد و بررسی کرده است (Huerta 2006; 2001). مقیاس‌پذیری تحلیل مبتنی بر پایداری است که امکان تحلیل خط رانش و استفاده از مدل‌های کوچک مقیاس را در تحلیل فراهم می‌آورد.

#### ۴. روش ترسیم قوس‌ها و ساخت مدل‌های فیزیکی

سه قوس ایرانی در این تحلیل مورد نظر هستند که نام آن‌ها از روایت زمرشیدی<sup>۲۶</sup> اقتباس شده است: قوس شماره ۱ به نام قوس تخم‌مرغی (زمرشیدی ۱۳۷۳، ۱۴۱)، قوس شماره ۲ به نام قوس مربع (پاتو پا - نیزه‌ای)<sup>۲۷</sup> (همان، ۱۷۰) و قوس ۳ قوس موسوم به پنج و هفت تند (همان، ۱۷۴) می‌باشد. روش ترسیم و شماره‌گذاری این سه قوس در تصویر ارائه شده است (تصویر ۳).



تصویر ۳: روش ترسیم قوس‌ها و شماره‌گذاری آن‌ها. (۱) قوس تخم‌مرغی. (۲) قوس مربع (پاتو پا - نیزه‌ای). (۳) پنج و هفت تند. جهت حرکت ریسمان در ترسیم هر قوس نشان داده شده است.

روش ترسیم قوس شماره ۱ (قوس تخم‌مرغی) این‌گونه است: یکی از مراکز ترسیم قوس،  $O1$  واقع بر ابتدای خط دهانه است. خطی با زاویه  $45^\circ$  درجه از  $O1$  ترسیم می‌گردد که پای عمود منصف دهانه را در  $O2$  قطع می‌کند. ابتدا سر ریسمانی به طول  $O1A$  در مرکز  $O1$  (پای قوس) قرار گرفته و کمانی به شعاع دهانه، با گنج متصل به انتهای ریسمان، با حرکت به سمت بالا ترسیم می‌گردد و با ادامه حرکت، قسمت میانی ریسمان به میخ واقع در نقطه  $O2$  گیر کرده و در ادامه مسیر حرکت خود، قسمت بالای قوس را ترسیم می‌کند. برای ترسیم قوس شماره ۲ (قوس مربع؛ پاتو پا - نیزه‌ای)، نقطه  $O1$  به فاصله برابر نصف دهانه، بر روی عمود رسم شده بر ابتدای خط دهانه قوس مشخص می‌شود. مرکز دوم،  $O2$ ، نقطه وسط خط دهانه قوس است. سر ریسمانی به اندازه مجموع  $O1O2$  و  $O2A$  بر مرکز  $O1$  قرار داده شده و با حرکت دادن ریسمان از بالا، نخست، بالای قوس را ترسیم نموده و با گیر کردن میان ریسمان به میخ واقع در مرکز  $O2$  در حرکت ریسمان به سمت پایین، قسمت پایین قوس نیز ترسیم می‌شود.

برای ترسیم قوس شماره ۳ (پنج و هفت تند)، نخست مربع  $mnpq$  را مطابق تصویر ۳ بر روی نیمه دهانه برپا می‌کنیم. با ترسیم کمانی به شعاع  $mq$  و مرکز  $q$ ، نخست، مرکز  $O2$  بر روی خط دهانه، و سپس، مرکز  $O1$  را بر روی

عمود رسم شده از  $q$  بر خط دهانه می‌یابیم. با ریسمانی به طول مجموع  $O1O2$  و  $O2A$  از مرکز  $O1$  کمانی را از بالای قوس رسم می‌کنیم که قسمت بالای قوس را می‌سازد. با حرکت ریسمان به سمت پایین و گیر کردن میانه ریسمان به میخ واقع در مرکز  $O2$  قسمت پایین قوس نیز ترسیم می‌شود.

مدل‌ها با استفاده از فوم حجمی زردرنگ به ضخامت ۵ سانتی‌متر ساخته شده‌اند. هر مدل مانند مدل پارامتریک نرم‌افزاری به ۱۲ قسمت تقسیم شده است (تصویر ۴ قطعه‌های فوم و نحوه چیدن آن‌ها را نشان می‌دهد). صفحه قرارگیری قوس با نقاله مجهز شده است که زاویه دوران آن قابل محاسبه باشد. دوران توسط یک جک که به آرامی حرکت می‌کند ایجاد می‌شود.



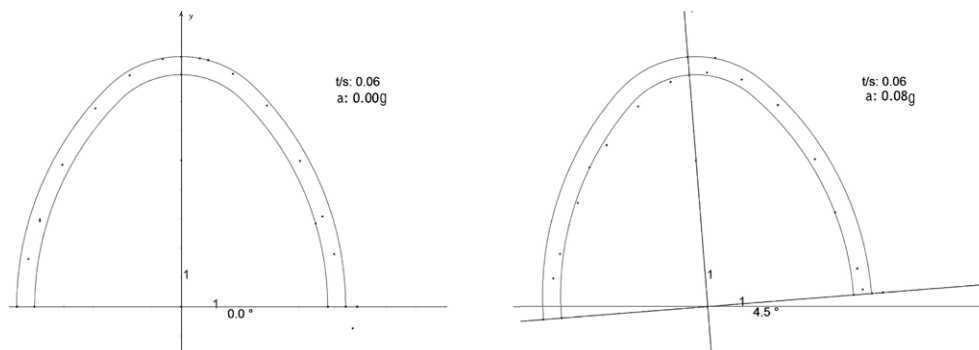
تصویر ۴: قطعه‌های فوم، شماره‌گذاری و بر روی هم چیده می‌شوند. صفحه زمین توسط یک جک به آرامی دوران می‌یابد.

## ۵. روش ترسیم خط رانش و کاربرد نرم‌افزار کبری

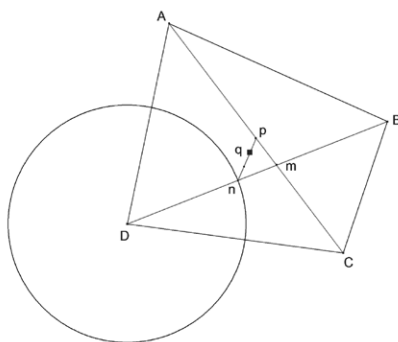
نرم‌افزار کبری نرم‌افزار هندسی است که برای آموزش ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار مهم‌ترین مشکل تحلیل‌های ترسیمی را برطرف می‌کند: تحلیل‌های ترسیمی وقت‌گیر هستند و با هر تغییر جزئی هندسی در مدل تحلیلی (برای مثال در این نوشتار، دوران قوس و تغییر ضخامت) باید مجدداً ترسیم‌ها انجام شوند که این امر فرایند تحلیل را بسیار دشوار می‌کند. قابلیت این نرم‌افزار در توان تبادل دوسویه اطلاعات و ترسیم پارامتریک است. بعد از یک بار ترسیم خط رانش، به روش مرسوم هندسی، با استفاده از ماژول‌های ترسیمی نرم‌افزار، بعد از اعمال تغییرات هندسی، می‌توان به صورت مکرر خط رانش را به‌روز کرد. نخستین بار بلاک و دیگران (Block, De Jong, and Ochsendorf 2006) از این قابلیت نرم‌افزار کبری برای بررسی خط رانش در قوس‌ها استفاده کرده‌اند.

نخست، با ماژول‌های ترسیمی نرم‌افزار، قوس را ترسیم می‌کنیم (شکل ۵). در صفحه نرم‌افزار، علاوه بر محورهای مختصات موجود، یک خط افقی به‌عنوان خطوط پایه ترسیم قوس رسم می‌کنیم تا امکان دوران قوس با دوران خط افقی ایجاد شود (تصویر ۵). نقطه  $a$  در تصویر ۶ که می‌تواند توسط کاربر جابه‌جا گردد، امکان تغییر ضخامت قوس را فراهم می‌آورد (تصویر ۶).

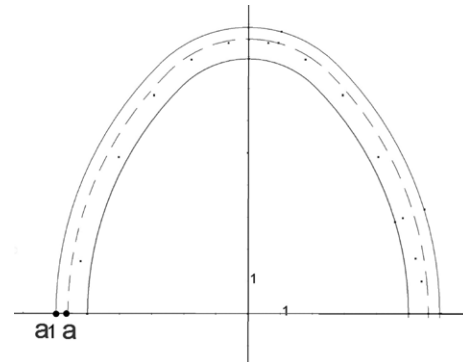
در ترسیم، قوس را به قطعه‌های مورد نظر تقسیم کرده، و مرکز ثقل هر قطعه را می‌یابیم: برای تعیین مرکز ثقل، هر قطعه یک چهارضلعی فرض می‌شود. برای سادگی کار، نخست در یک فایل کمکی، مرکز ثقل یک چهارضلعی دلخواه را می‌یابیم و آن را به‌عنوان ماکرو<sup>۲۸</sup> ذخیره می‌کنیم. در این ماکرو، با تعریف چهار رأس چهارضلعی به‌عنوان نقاط اولیه<sup>۲۹</sup> مرکز ثقل را به‌عنوان نقطه نهایی<sup>۳۰</sup> دریافت می‌کنیم. ماژول ماکروی نرم‌افزار این قابلیت را ایجاد می‌کند که بعد از تعریف یک ماکرو، همواره، در هر فایل دیگر از این ساختار هندسی استفاده کنیم. در فایل اصلی، با باز کردن ماکروی تعریف‌شده در فایل کمکی، با انتخاب چهار رأس یک قطعه، مرکز ثقل قابل دسترسی باشد. (یافتن مرکز ثقل به روش هندسی مشهور در تصویر ۷ معرفی شده است).



تصویر ۵: ترسیم در نرم‌افزار باید بر روی یک خط افقی پایه گذرنده از مبدأ، غیر از محور مختصات انجام شود تا امکان دوران قوس فراهم گردد. تصویر سمت راست نشان می‌دهد که با دوران خط افقی پایه نسبت به تصویر سمت چپ، قوس دوران می‌کند. نرم‌افزار تاوانت زاویه دوران را در هر لحظه نشان می‌دهد که با ضرب آن در شتاب زمین، شتاب جانبی مشخص می‌شود (ترسیم در نرم‌افزار کبری).

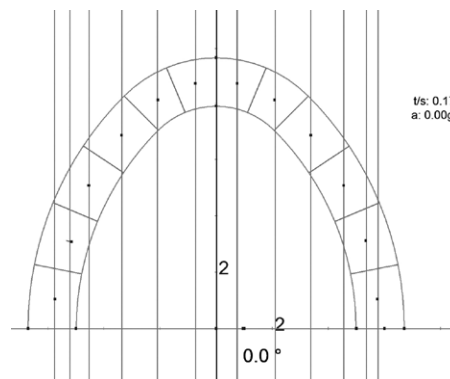


تصویر ۷: یافتن مرکز ثقل یک چهارضلعی. قطرهای چهارضلعی را رسم می‌کنیم. به مرکز D به شعاع Bm دایره‌ای رسم می‌کنیم تا قطر BD را در n قطع کند. نقطه وسط AC یعنی p را می‌یابیم. خط pn را رسم و آن را به سه قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم. نقطه q مرکز ثقل است (ترسیم در نرم‌افزار کبری).



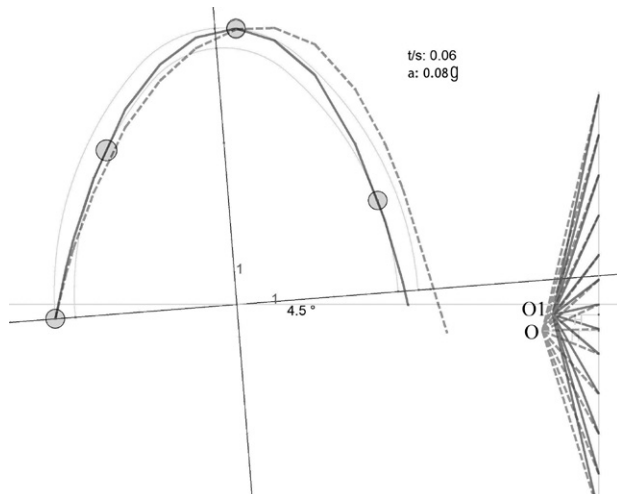
تصویر ۶: با جابه‌جایی نقطه a، امکان تغییر ضخامت قوس فراهم می‌آید (ترسیم در نرم‌افزار کبری).

بعد از یافتن مراکز ثقل قطاع‌ها، خط اثر نیروی وزن هر قطعه قوس را ترسیم می‌کنیم: این خطوط باید بر محور افقی مختصات و نه خط پایه قوس عمود باشند تا با دوران این خط پایه، امتداد نیروی وزن همواره عمود بر محور افقی مختصات باقی ماند (تصویر ۸).



تصویر ۸: ترسیم خط اثر نیروی وزن قطاع‌ها که از مرکز ثقل آن‌ها می‌گذرد و بر محور افقی مختصات عمود است (ترسیم در نرم‌افزار کبری).

حال به ترسیم خط رانش می‌پردازیم. ترسیم خط رانش مانند ترسیم دستی معمول می‌باشد که در مراجعی مانند تئوری ساختمان‌ها (تیموشنکو و یانگ ۱۳۷۳، ۲۵-۲۰) ذکر شده است. مزیت نرم‌افزار این است که بعد از یک بار ترسیم، با جابه‌جا کردن قطب خط رانش (نقطه O در تصویر ۹)، بدون نیاز به ترسیم مجدد خط رانش، می‌توان در هر لحظه دوران قوس، خط رانش را به‌روز کنیم (تصویر ۹).



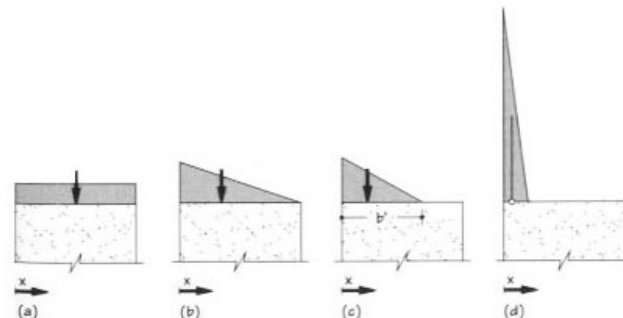
تصویر ۹: بعد از یک بار ترسیم خط رانش، در هر وضعیت دوران قوس، امکان به‌روز کردن خط رانش، بدون نیاز به ترسیم مجدد، با جابه‌جا کردن قطب O وجود دارد. در هر لحظه دوران، می‌توان با جابه‌جا کردن نقطه O خط رانش دلخواه را ایجاد کرد (تحلیل و ترسیم در نرم‌افزار کبری).

## ۶. حداقل ضخامت مورد نیاز برای پایداری قوس تحت اثر وزن خود

مسئله حداقل ضخامت مورد نیاز برای قرارگیری یک خط رانش در یک قوس، همواره مد نظر طراحان و مهندسان بوده است (نک: Huerta 2001). این مسئله در چهارچوب تحلیل حدی، برای قوس‌های کمان دایره، توسط هیمن (1966) مطرح و با دقت بیشتر توسط اوشندورف بررسی شده است. در ظاهر، یافتن این حداقل ضخامت کلیدی به نظر نمی‌رسد؛ زیرا در این ضخامت، قوس در نقطه فروریختگی قرار دارد. اما نکته‌ای مهم در این تحلیل وجود دارد: هیمن حداقل ضخامت قوس را به‌عنوان معیاری برای یافتن ضریب ایمنی ساخت یک قوس تحت اثر وزن خود قرار می‌دهد (Ochsendorf 2005)؛ یعنی یک قوس واقعی برای ایستادن تحت اثر وزن خود باید با ضریب اطمینانی حدود  $1/2$  و  $1/3$  مقدار حداقل ضخامت خود ساخته شود (Ibid).

برای فهم محل نحوه قرارگیری خط رانش در این حالت و ارتباط آن مکانیسم فروریختگی، توجه به قانون یک‌سوم وسط ضروری است. همان‌گونه که تصویر ۱۰ نشان می‌دهد، تا زمانی که خط اثر نیرو در یک‌سوم وسط یک بلوک قرار دارد، تمامی مقطع در فشار کار می‌کند. با خروج خط اثر نیرو، از یک‌سوم وسط بلوک، در یک سمت، سمت مقابل در کشش افتاده و این به معنای ترک‌خوردگی در این مقطع است. با ادامه این کار، و رسیدن خط اثر نیرو به انتهای بلوک، ترک‌خوردگی کامل و تشکیل مفصل کامل پلاستیک صورت می‌پذیرد (تصویر ۱۰). رسیدن خط رانش به جداره قوس، در این نوشتار، به معنای تشکیل مفصل در آن نقطه است. از این‌رو، در هر یک از قوس‌های تصویر ۱۱، به‌دلیل رسیدن خط رانش‌ها به انتهای مقطع قوس‌ها در بیش از سه نقطه، یک مکانیسم فروریختگی روی داده است.





تصویر ۱۰: بالا: از چپ به راست: (۱) خط اثر نیرو در یک سوم میانی قوس، (۲) عبور خط اثر نیرو از یک سوم وسط و آغاز ترک خوردگی مقطع در سوی دیگر، و در نهایت: (۳) رسیدن خط اثر نیرو بر جداریه بلوک و تشکیل مفصل پلاستیک کامل. پایین: توزیع تنش در مقطع از چپ به راست: اعمال نیرو در یک سوم وسط، در آستانه عبور از یک سوم وسط، با خروج از یک سوم وسط و در لحظه اعمال نیرو به لبه بلوک (Allen and et al. 2010).

در این نوشتار، با ترسیم خط رانش نیروها در نرم افزار کبری، در یک مدل پارامتریک و با تغییر توأمان ضخامت و با سعی و خطا برای یافتن خط رانش، حداقل نسبت ضخامت به دهانه تعیین می شود؛ نسبت ضخامت به دهانه قوس آن قدر کم می گردد که تنها یک خط رانش در قوس قرار گیرد. همان گونه که تصویر ۱۱ نشان می دهد. خط رانش قوس در بیش از سه نقطه به انتهای مقطع عرضی می رسد و همان طور که در بالا ذکر شد، قوس با این حداقل نسبت ضخامت به دهانه، در حالت یک مکانیسم فروریختگی قرار دارد و در نتیجه، ناپایدار می باشد. دایره های خاکستری رنگ محل مفصل پلاستیک را برای قوس با حداقل نسبت ضخامت به دهانه نشان می دهند (تصویر ۱۱).

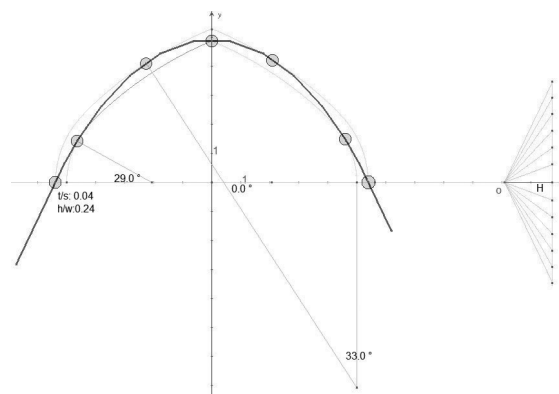
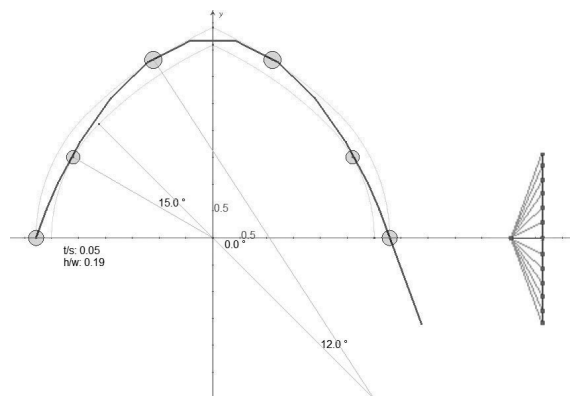
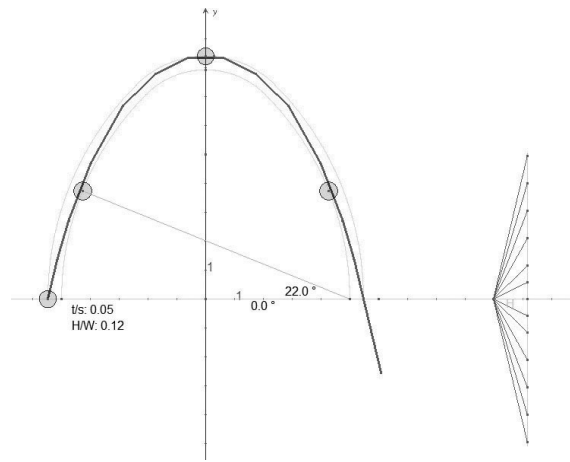
حداقل نسبت ضخامت به دهانه برای سه قوس در جدول ۱ مشخص است.

جدول ۱: مقادیر استخراج شده برای حداقل نسبت ضخامت به دهانه قوس ها

شماره قوس	قوس ۱	قوس ۲	قوس ۳
حداقل نسبت ضخامت قوس به دهانه برای قرارگیری یک خط رانش در قوس (t/s)	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴

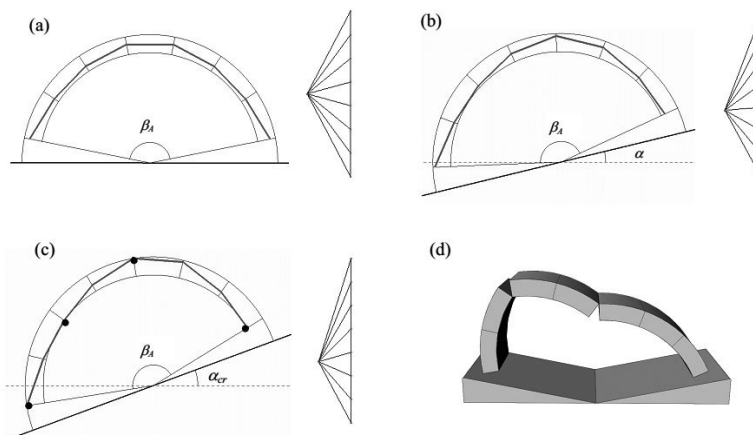
## ۷. میزان شتاب افقی لازم برای فروریختگی قوس ها تحت اثر نیروی زلزله

فرایند تحلیلی روش به کار گرفته شده در این نوشتار، معکوس فرایند بارگذاری سازه ها مطابق آیین نامه است. در حالی که در آیین نامه، شتاب وارده به سازه مشخص شده و پاسخ ساختمان نسبت به آن تعیین می شود. در این روش، از طریق بررسی نیروی افقی لازم برای فروریختگی قوس، حد نهایی پایداری قوس تعیین می شود. تانژانت زاویه دوران در لحظه فروریختگی نشان می دهد که قوس چه نسبتی از وزن خود می تواند نیروی جانبی تحمل کند. کلمته (Clemente 1998) نشان می دهد که برای فروریختگی یک قوس در اثر شتاب افقی، چهار مفصل، دو مفصل در انحنای درونی و دو دیگر در انحنای خارجی قوس مورد نیاز است که یکی از مفصل ها حتما در پای قوس

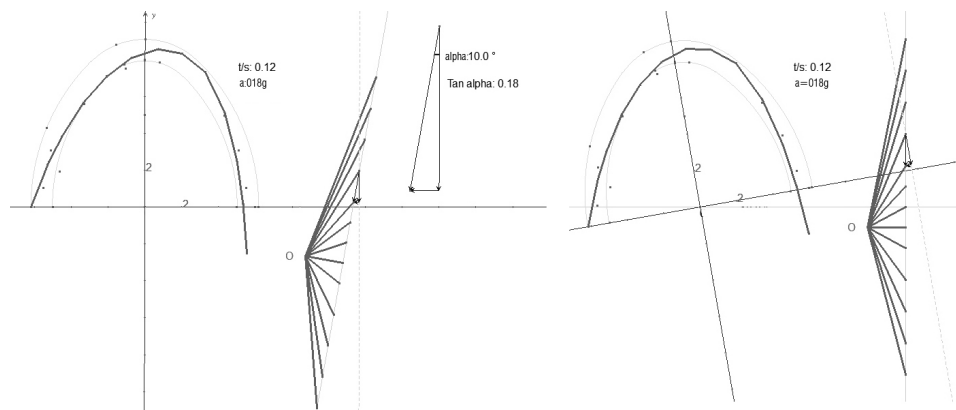


تصویر ۱۱: محاسبه حداقل نسبت ضخامت به دهانه مورد نیاز برای قرارگیری یک خط رانش در سه قوس ایرانی. به ترتیب از بالا قوس شماره ۱، ۲ و ۳. در هر شکل نسبت نیروی رانش به وزن کل (H/W) و محل مفصل پلاستیک درج شده است (تحلیل و ترسیم در نرم‌افزار کبری). در هر تصویر، زاویه‌های مشخص شده محل مفصل‌های پلاستیک را نسبت به مراکز ترسیمی قطاع‌های قوس نشان می‌دهند.

تشکیل می‌شود (تصویر ۱۲). (البته برای استفاده از این روش فرض‌های هیمن ضروری است). بلاک و دیگران (Block, De Jong, and Ochsendorf 2006) و دی جونگ (De Jong 2009) حل ترسیمی این موضوع را با استفاده از خط رانش طرح می‌کنند (تصویر ۱۲). اگر به قوس شتاب افقی اعمال گردد، نیروهای وزن در نمودار خط رانش با نیروی افقی زلزله که نسبتی از نیروی وزن هر قطعه است، متأثر می‌شوند (تصویر ۱۳). در این حالت، به دلیل اعمال شتاب یکسان به تمامی جرم‌های سیستم (با فرض جسم صلب)، بردار نیروی وزن تمامی قطعات در خط نیرو با یک زاویه یکسان دوران می‌یابد. این کار معادل این است که نمودار خط رانش ثابت باشد و صفحه زمین و قوس واقع بر آن دوران نمایند. چنانچه بتوان در هر حالت دوران یافته یک قوس، خط رانشی جست‌وجو کرد که در قوس قرار گیرد، قوس پایدار است (قضیه حد پایین). در صورتی که در یک زاویه دوران، خط رانش منحصر به فردی یافت شود که درون قوس قرار گیرد، اما این خط نشانگر یک مکانیسم فروریختگی باشد (قضیه حد بالا)، این حالت حد نهایی لرزه‌ای قوس می‌باشد. تانژانت زاویه دوران نشان‌دهنده نسبت نیروی افقی وارده به نیروی وزن سیستم (یا نسبت شتاب افقی زلزله به شتاب زمین  $g$ )، در آستانه فروریختگی است. (برای مثال، اگر در این شرایط، تانژانت زاویه دوران  $0.7$  باشد، جرم قوس، و با فرض جسم صلب، جرم‌های تک‌تک قطعات قوس، تحت نیرویی افقی معادل  $0.7$  وزن خود قرار گرفته‌اند).



شکل ۱۲: شبیه‌سازی اثر بار زلزله بر روی پایداری یک قوس با مفهوم دوران صفحه زمین (De Jong 2009). چهار مفصل به صورت یکی در میان در انحنای داخلی و خارجی قوس تشکیل می‌شوند. یکی از آن‌ها، همواره، در پای قوس ایجاد می‌شود.



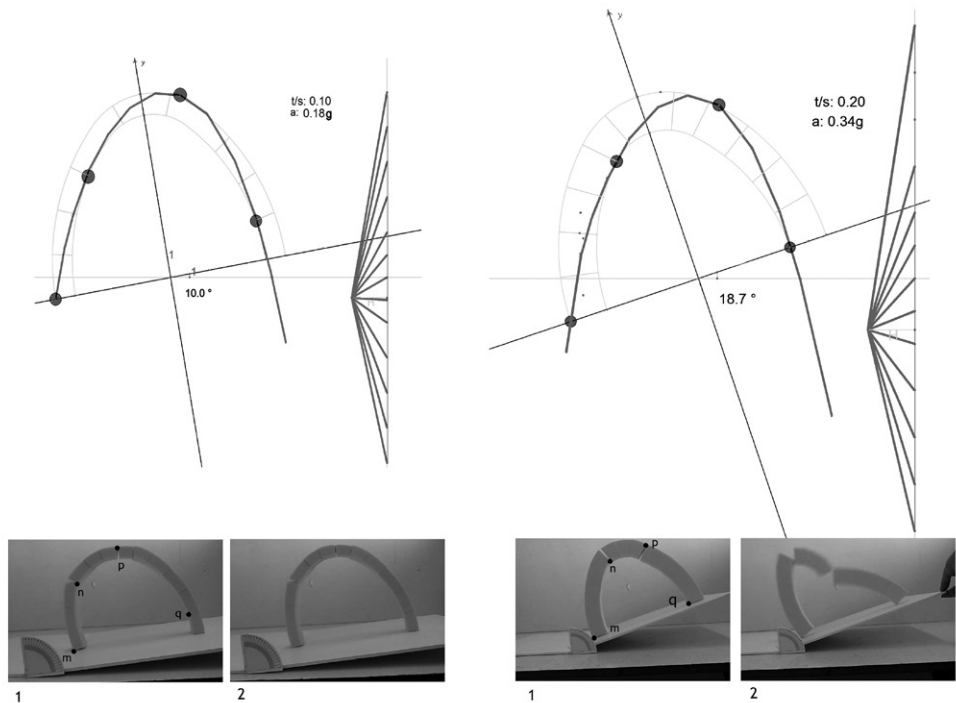
تصویر ۱۳: چپ: اعمال شتاب جانبی نیروهای افقی را که نسبتی از وزن قطعه‌ها می‌باشند، در قطعات ایجاد می‌کند و در نتیجه، نمودار نیرو دوران می‌یابد. راست: این عمل معادل دوران صفحه زمین با زاویه‌ای است که تانژانت آن نسبت نیروی افقی وارده به نیروی وزن سیستم را نشان می‌دهد (تحلیل و ترسیم در نرم‌افزار کبری). در هر دو حالت، باید مسیر نیرویی در قوس یافت.

تحلیل را برای سه قوس ایرانی مورد توجه قرار می‌دهیم. تحلیل از حداقل ضخامت قوس برای پایداری آغاز می‌شود و تا ضخامت ۲/۱۰ دهانه انجام می‌گیرد که ضخامت‌های متداول قوس‌های ایرانی در این محدوده قرار می‌گیرند. بعد از ترسیم قوس‌ها در نرم‌افزار، صفحه زمین را دوران داده و حالت حدی خط رانش را در آن‌ها جست‌وجو نموده و تانژانت زاویه حدی را ثبت کرده‌ایم. هر خط رانش از نظر ریاضی، دقیقاً توسط سه نقطه در صفحه مشخص می‌شود (تیموشنکو و یانگ ۱۳۷۳). و در حالت کلی، از نظر ریاضی، نمی‌توان خط رانشی ترسیم کرد که از چهار نقطه از پیش تعیین شده بگذرد. از این رو، چنانچه سه مفصل در مدل ترسیمی بر روی سه بند قرار گیرند، مفصل چهارم در حالت کلی بر روی یک بند واقع نیست و در میان دو بند، بر روی خود یک قطعه قوس قرار می‌گیرد. قطعات مدل فیزیکی بر روی شاسی بر روی یکدیگر چیده شدند. سپس، با دوران آهسته شاسی (صفحه زمین) لحظه فروریختگی حرکت قوس مشاهده شد. فرایند فوق توسط فیلم برداری ضبط شد و زاویه دوران ثبت گردید. همان گونه که در بالا ذکر شد، یکی از مفاصل، در حالت کلی، بر بند واقع نیست؛ در لحظه، فروریختگی مفصل نظری به نزدیک‌ترین بند پرش<sup>۳۱</sup> می‌نماید.

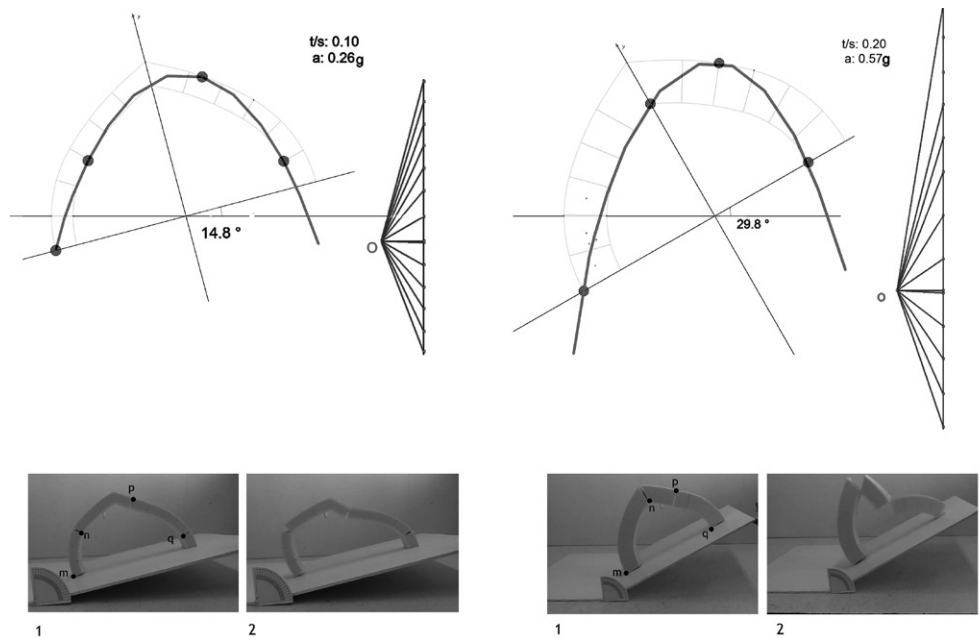
جدول (۲) و نمودار (۱) میزان شتاب افقی برای فروریختگی قوس‌های مورد نظر با نسبت ضخامت به دهانه‌های متفاوت را در تحلیل خط رانش، مدل فیزیکی و درصد اختلاف آن‌ها را نشان می‌دهند. برای مثال، در تحلیل خط رانش، قوس شماره ۱ در نسبت ضخامت به دهانه ۰/۲ می‌تواند ۱۸/۷ درجه دوران نماید که تانژانت این زاویه ۰/۳۴ است. مقاله در مدل‌سازی فیزیکی، زاویه دوران را ۱۵ درجه نشان می‌دهد که تانژانت آن ۰/۲۷ می‌باشد. درصد اختلاف دو پاسخ حاصل از مقطع مؤثر مدل نرم‌افزاری با ضخامتی معادل ۸۰ درصد و پاسخ مدل فیزیکی را مقایسه می‌کند. در مثال ذکر شده قوسی با ضخامت ۰/۱۶ معیار مقایسه قرار می‌گیرد که میزان اختلاف پاسخ‌ها در این حالت ۴ درصد است. شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ مقایسه تحلیل خط رانش و رفتار مدل فیزیکی را نشان می‌دهند.

جدول ۲: حد نهایی پایداری سه قوس برای نسبت ضخامت به دهانه‌های متفاوت. مقادیر ذکر شده نشان‌دهنده نسبت نیروی افقی وارده به سیستم به وزن آن در آستانه فروریختگی هستند که معادل تانژانت زاویه دوران است.

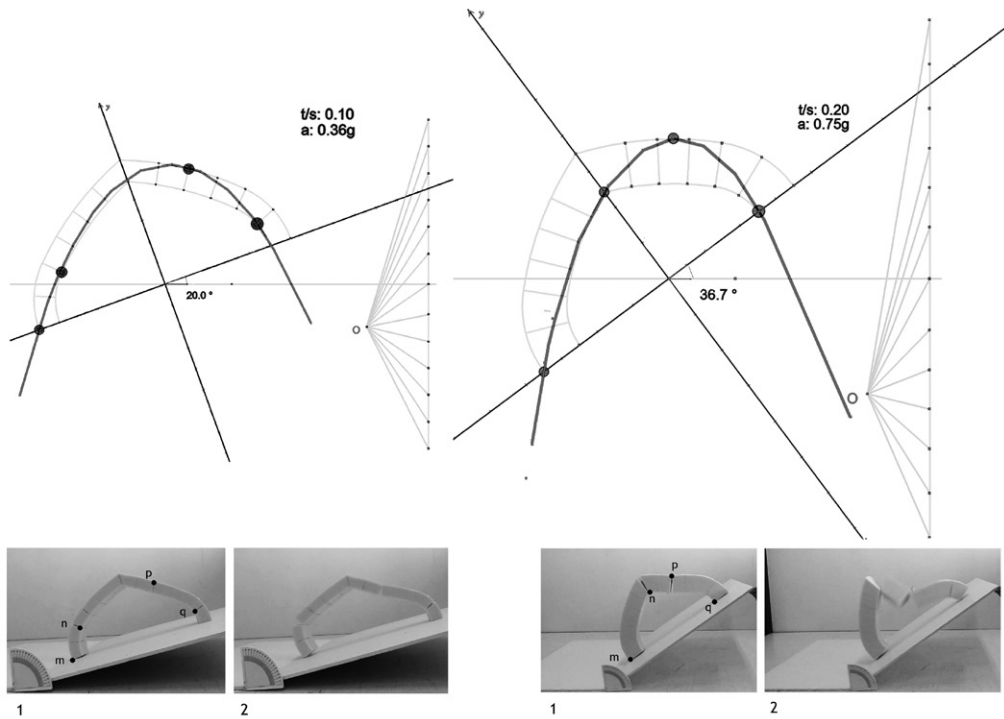
نسبت ضخامت به دهانه	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲۰
نتایج تحلیل خط رانش برای قوس شماره ۱	-	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۳۴
نتایج تحلیل مدل فیزیکی مدل شماره ۱	-	-	-	-	-	۰/۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰/۲۷
درصد اختلاف	-	-	-	-	-	۳۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴
نتایج تحلیل خط رانش برای قوس شماره ۲	-	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۴۴	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۵۷
نتایج تحلیل مدل فیزیکی مدل شماره ۲	-	-	-	-	-	۰/۱۹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰/۵۰
درصد اختلاف	-	-	-	-	-	۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۶
نتایج تحلیل خط رانش برای قوس شماره ۳	-	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۳۰	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۶۰	۰/۶۳	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۷۲	۰/۷۵
نتایج تحلیل مدل فیزیکی مدل شماره ۳	-	-	-	-	-	۰/۲۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰/۷۰
درصد اختلاف	-	-	-	-	-	۱۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۰



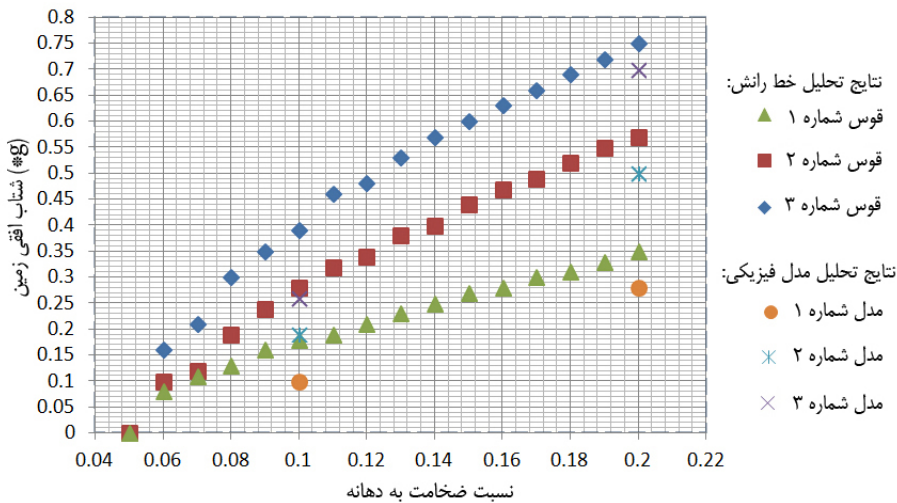
تصویر ۱۴: بررسی فروریختگی قوس شماره ۱ با تحلیل خط رانش، مشخص کردن زاویه دوران، شتاب افقی (a) و محل مفاصل پلاستیک. (بالا - چپ: برای نسبت ضخامت به دهانه ۱/۱۰، بالا-راست: برای نسبت ضخامت به دهانه ۲/۱۰). مراحل ۱ و ۲، محل و لحظه تشکیل مفاصل پلاستیک و فروریختگی در مدل فیزیکی می‌باشند. (پایین-چپ: برای نسبت ضخامت به دهانه ۱/۱۰، پایین-راست: با نسبت ضخامت به دهانه ۲/۱۰)



تصویر ۱۵: بررسی فروریختگی قوس شماره ۲ با تحلیل خط رانش، مشخص کردن زاویه دوران، شتاب افقی (a) و محل مفاصل پلاستیک. (بالا - چپ: برای نسبت ضخامت به دهانه ۱/۱۰، بالا-راست: برای نسبت ضخامت به دهانه ۲/۱۰). مراحل ۱ و ۲، محل و لحظه تشکیل مفاصل پلاستیک و فروریختگی در مدل فیزیکی هستند. (پایین-چپ: برای نسبت ضخامت به دهانه ۱/۱۰، پایین-راست: با نسبت ضخامت به دهانه ۲/۱۰)



تصویر ۱۶: بررسی فروریختگی قوس شماره ۳ با تحلیل خط رانش، مشخص کردن زاویه دوران، شتاب افقی (a) و محل مفاصل پلاستیک. (بالا - چپ: برای نسبت ضخامت به دهانه ۱/۱۰، بالا- راست: برای نسبت ضخامت به دهانه ۲/۱۰). مراحل ۱ و ۲، محل و لحظه تشکیل مفاصل پلاستیک و فروریختگی در مدل فیزیکی می‌باشند. (پایین- چپ: برای نسبت ضخامت به دهانه ۱/۱۰، پایین- راست: با نسبت ضخامت به دهانه ۲/۱۰)



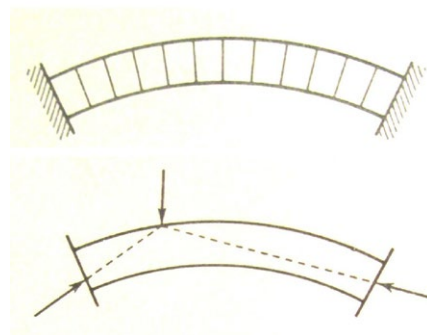
نمودار ۱: میزان شتاب افقی به دست آمده به صورت مضربی از شتاب زمین، در حد نهایی پایداری لرزهای قوس‌های مورد نظر، برای نسبت ضخامت به دهانه‌های متفاوت، به روش تحلیل خط رانش و مدل‌سازی فیزیکی

بحث

طرح بحث‌های ذیل در این نوشتار مناسب است:

- قوس‌های شماره ۳ (پنج و هفت تند) و ۲ (قوس مربع) و ۱ (تخم‌مرغی) (در نسبت ضخامت به دهانه برابر)، نسبت به یکدیگر، به ترتیب شماره ذکر شده، پایداری لرزه‌ای مناسب‌تری دارند.

- در این نمونه‌ها، با افزایش ضخامت یک قوس، پایداری لرزه‌ای افزایش می‌یابد. این امر بر نتایج اوشندورف (Ochsendorf 2005)، شاپیرو (Shapiro 2010) و دی جونگ (De Jong 2009) منطبق است. در حالت کلی، هرچه قوس ضخیم‌تر باشد، امکان جست‌وجوی یک مسیر تعادل، خط رانش در آن راحت‌تر است. هیمن (۱۳۷۳) اشاره می‌کند که قوس بسیار خفته یا ضخیم، در صورتی که پایه آن حرکت نکند، از لحاظ نظری، هیچ‌گاه فرو نخواهد ریخت (تصویر ۱۷). افزایش امکان جست‌وجوی خط رانش با افزایش ضخامت در وضعیت دوران صفحه زمین نیز صادق است. در اینجا لزوم توجه به تفاوت رفتار «مبتنی بر پایداری» و رفتار «مبتنی بر مقاومت مصالح» ضروری است. پایداری قوس ناشی از امکان برقرار ماندن تعادل در اندرکنش وزن قطعات قوس و نیروی جانبی وارد بر آن‌هاست. برای مثال، قطعه میان دو مفصل  $m$  و  $n$  در شکل ۱۴ (پایین - راست) در مقابل نیروهای زلزله نقش پایدارکننده دارند. در مقابل، قطعات میان مفصل  $n$  و  $p$  و همین‌طور میان مفصل  $p$  و  $q$ ، در همراهی با نیروی زلزله، نقش ناپایدارکننده دارند. علت این امر این است که برای جابه‌جایی (یا همان دوران) قطعه اول، این قطعه باید به سمت بالا حرکت کند که نیروی وزن آن در برابر آن مقاومت می‌کند (کار وزن این قطعه منفی است). درحالی که حرکت دو قطعه دیگر در زلزله به‌گونه‌ای است که نیروی وزن آن‌ها با نیروی زلزله همسوس (کار تمام نیروهای زلزله و وزن‌های این دو قطعه مثبت می‌باشند). در نتیجه، گرچه هرچه ضخامت و در نتیجه جرم افزایش یابد، نیروی زلزله (ناشی از جرم ضرب در شتاب زلزله) افزایش می‌یابد، نیروی پایدارکننده که ناشی از وزن قطعه قوس است، نیز، به همان نسبت افزایش می‌یابد. از این رو، مسئله پایداری یک قوس بنایی، در زلزله، از جرم آن مستقل است و تنها به تناسب هندسی آن و امکان جست‌وجوی خط رانش در قوس بستگی دارد. تعبیر ملموس این نکته این است که در زلزله، بلوک‌های با تناسب هندسی یکسان از آجر، یونولیت، بتن و یا هر مصالح دیگری هم‌زمان ناپایدار و واژگون می‌شوند (بدیهی است که علت این امر ماهیت متفاوت زلزله با باد می‌باشد: زلزله از جنس اینرسی و باد از جنس نیرو می‌باشد). (برای توضیح کامل این مسئله نک: Huerta 2006؛ ایزدپناه ۱۳۹۷).



تصویر ۱۷: یافتن یک مسیر نیرو در یک قوس خفته، کار آسانی است. قوس بسیار خفته در صورتی که پایه‌های آن حرکت نکند و شروط مقاومت مصالح مخدوش نشود، به‌صورت نظری هیچ‌گاه تسلیم نخواهد شد (هیمن ۱۳۷۳).

- سه قوس نسبت به یکدیگر اختلاف خیز دارند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد کاهش خیز اثر پایدارکننده‌ای در رفتار قوس (مجزا از پایه) دارد. این امر بر نتایج پژوهش‌های قبلی (De Jong 2009; Ochsendorf 2005) منطبق است. یک تعبیر از علت این موضوع، امکان قرارگیری خط رانش‌های بیشتر در این حالت است که در بند قبلی نیز ذکر شد.

- افزایش ضخامت و کاهش خیز و به تبع افزایش پایداری لرزه‌ای قوس را نباید به سرعت یک مزیت فرض کرد؛ زیرا ترکیب اثر قوس با پایه و افزایش رانش، در اثر هر دو تغییر هندسی فوق، مجموعه قوس و پایه را سریع‌تر واژگون نماید. همچنین کاهش خیز رانش پایه را در بار قائم افزایش خواهد داد و پایه را در معرض واژگونی قرار خواهد داد. مناسب است پایداری لرزه‌ای مجموعه قوس و پایه در مطالعات بعدی به صورت دقیق مورد بررسی قرار گیرد.

- نمودار نشان می‌دهد که رابطه دو مؤلفه سازنده نمودار خطی نیست. با افزایش نسبت ضخامت به دهانه میزان پایداری قوس‌های ۳ و ۲ و ۱ به ترتیب نسبت به یکدیگر، افزایش مشهودی می‌یابد.

- تمامی قوس‌های مورد نظر، در تناسب‌های مرسوم در ایران، در اوج شتاب زمین، در یک زلزله قوی فرومی‌ریزند. البته این نوشتار تحلیل معادل استاتیکی را در نظر گرفته که در آن یک بار افقی بدون بازه زمانی مشخصی اعمال شده و ممکن است به دلیل خصلت رفت و برگشتی زلزله قوس‌ها بتوانند احیا شوند، اما به هر حال، تضمینی در این باره وجود ندارد. یک پاسخ برای حل مشکل فروریزش سازه‌های دوبعدی، رواج پوشش‌های سه‌بعدی سقف در پهنه سرزمینی ایران بوده است که در عمل، امکان مناسب‌تر و مسیرهای محتمل بیشتری برای پایداری در پوشش‌های سقف فراهم می‌آورده‌اند.

- شتاب استخراج‌شده از نمونه‌های این نوشتار شتاب زمین است و از اثرات سختی سازه دیوار بر روی قوس صرف‌نظر شده است.

- مدل‌های فیزیکی مقادیر کمتری برای حد پایداری سازه نشان می‌دهند. لبه‌های قطعات مجاور در مدل فیزیکی به دقت لبه‌های قطعات ترسیمی توسط نرم‌افزار نیستند و به تبع، خط رانش دقیقاً در لبه پیش‌بینی شده به صورت نظری قرار نمی‌گیرد؛ معمولاً این لبه‌ها به سمت داخل حالت خمیده دارند (شکل ۱۸) که به معنای کاهش مقطع قوس در محل تماس قطعات هستند. در این حالت، میزان مقطع مؤثر کاهش می‌یابد و قوس مانند قوسی با نسبت ضخامت به دهانه کمتر عمل می‌کند. می‌توان مدل‌هایی از قوس‌ها را با قطعاتی با لبه‌های بسیار دقیق ساخت، اما دقیق‌تر ساختن مدل‌ها راهکار مناسبی نیست؛ زیرا قوس‌های بنایی نیز در واقعیت، به دلیل ناهمواری لبه آجرها یا قطعات سنگ، با لبه‌های دقیقی ساخته نمی‌شوند و این دقت در ساخت باعث فاصله گرفتن تحلیل از واقعیت می‌شود. خطاها از دیدگاه اوشندورف (۲۰۰۵) نیز به دلیل عدم دقت متداول در ساخت مدل‌هاست. دی جونگ اشاره دارد که در فرایند آزمایش نیز در هر دفعه فروریختن و برخورد قطعات با زمین، لبه آن‌ها گردتر شده و مقطع مؤثر کاهش می‌یابد (De Jong 2009).

- شاپیرو (Shapiro 2010) و دی جونگ (De Jong 2009) مقطع مؤثری را ۸۰ درصد ضخامت مقطع قوس پیشنهاد کرده‌اند. در این حالت، در پژوهش شاپیرو، مقایسه نتیجه تحلیل خط رانش قوس با مقطع مؤثر ۸۰ درصد با مدل فیزیکی حدود ۱۳ درصد اختلاف نشان می‌دهد. برای مدل‌های این نوشتار میان ۰ تا ۱۵ درصد اختلاف وجود دارد، اما برای قوس شماره یک، در نسبت ضخامت به دهانه ۰/۱ که ضعیف‌ترین قوس نیز می‌باشد، اختلاف حدود ۳۰ درصد است و در نظر گرفتن مقطع مؤثری حدود ۷۰ درصد ضخامت قوس پیشنهاد می‌گردد.

- مسئله دیگر، تفاوت محل دقیق نقطه تماس خط رانش با قوس در نرم‌افزار و مدل فیزیکی در یکی از مفاصل است. همان گونه که در قبل اشاره شد، مفصل چهارم در حالت کلی بر روی یک بند نیست. از این رو، یکی از چهار مفصل در حالت‌های بررسی نظری و فروریختگی فیزیکی در موقعیت دقیقاً یکسانی واقع نیستند. این پرش در آخرین لحظات دوران، یک ضربه به قوس وارد می‌کند که تعادل قوس را زودتر از حالت نظری به هم می‌زند. آشکار است که امکان اجتناب از این اتفاق در واقعیت نیز وجود ندارد.

- این روش تحلیل، مانند سایر روش‌ها، از یک مدل‌سازی ریاضی انتزاع شده استفاده می‌کند. برای حذف عدم اطمینان ناشی از مقاومت و سایر مشخصات فنی مصالح ملات، این روش قطعات را گوه شکل فرض می‌کند. وجود ملات و نحوه اجرای آن ممکن است بر مقطع مؤثر قوس تأثیر بگذارد. به هر حال، وجود این عدم یقین‌ها در تمامی روش‌های تحلیل موجود هستند و لزوم به کارگیری موازی و تطبیقی روش‌های تحلیلی متفاوت در فرایند مرمت یک بنای واقعی را گوشزد می‌کنند.

## مطالعات معماری ایران

دو فصلنامه معماری ایرانی  
شماره ۱۷ - بهار و تابستان ۹۹

۱۵۸

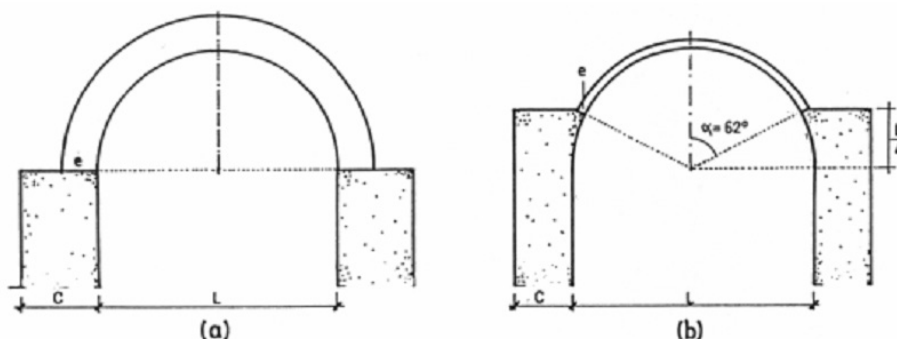


تصویر ۱۸: لبه‌های قطعات قوس دقیق نیستند و به داخل خم شده‌اند.

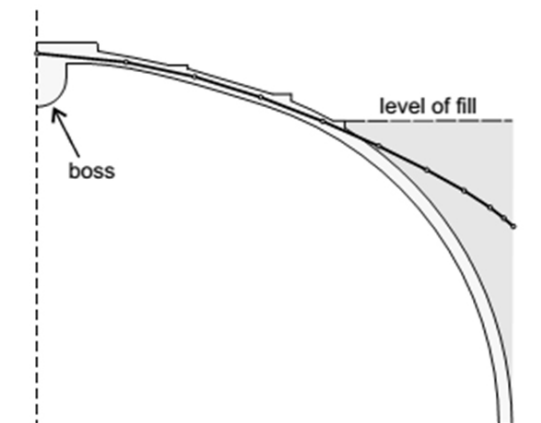


- در پیشینه بررسی شده در حوزه تحلیل پلاستیک، حدی برای دهانه قوس مورد تحلیل تعیین نشده است. مگر آنکه قوس آنقدر بزرگ گردد که تحت وزن خود دچار خردشدگی<sup>۳۳</sup> شود؛ یعنی فرض مقاومت فشاری مناسب مصالح بنایی (فرض اول Heyman 1966) مخدوش شود که در ابعاد مرسوم بناهای تاریخی نامحتمل است. هورتا (2006) در مقاله خود با عنوان «گاليله در خطا بود» به طور مفصل به نامربوط بودن بسط قانون توان دوم-سوم توسط گاليله و سپس، توسط محققان مدرن پیش از هیمن، به سازه‌های بنایی اشاره می‌کند: نگرانی تحلیلگران به کارگیرنده روش الاستیک از خردشدگی مصالح با افزایش ابعاد سازه تحت اثر این تعمیم نامربوط بوده است. هیمن (1966) در بررسی‌های خود نشان می‌دهد که برای مثال، برای خردشدگی یک دیوار گوتیک، تحت وزن خود و بارناشی از گنبد و خاکریز سقف، ارتفاع کلیسا باید حدود ۳۵۰ متر باشد که این امر در ابعاد مرسوم محتمل نیست. هیمن (۱۳۷۳) اشاره می‌کند که در بسیاری از بناهای تاریخی، تنش‌ها کمتر از ۱۰ درصد تنش تسلیم مصالح می‌باشند.

- کاهش خیز قوس در بناهای تاریخی، علاوه بر تغییر هندسه قوس، از طریق‌های دیگر، نیز، قابل تأمین بوده است. در بناهای گوتیک، این امر از طریق ریختن خاکریزی که توسط پشتیبند حمایت می‌شده، حاصل شده است. (یکی از پشت بندهای گوتیک بالاتر از پای تاق برای حمایت خاکریز ساخته می‌شده است. برای شرح کامل نک: Heyman 1966). هیمن (1966)، هورتا (2006) و بلاک (2009) درباره اثر پایدارکننده خاکریز در معماری گوتیک تحقیقات مفصلی ارائه کرده‌اند. اضافه بر آن، هورتا (2006) اشاره می‌کند تعبیه خاکریز سبب کاهش خیز و امکان کاهش ضخامت قوس در این حالت شده و به تبع، در مصالح مصرفی قوس صرفه‌جویی شده است؛ زیرا همان گونه که در قبل ذکر شد، امکان قرارگیری خط رانش در قوس با خیز کمتر دستیاب‌تر است (شکل ۱۷ و ۱۹). کاهش خیز قوس در سقف از این طریق ذکر شده، طبق یکی از نتایج این نوشتار، یعنی افزایش مقاومت لرزه‌ای با کاهش خیز، به پایداری لرزه‌ای قوس کمک می‌کند. اما هنوز لزوم بررسی اثر این خاکریز بر مجموعه قوس و پایه احساس می‌شود. در مورد اثر پایدارکننده کانه‌پوش در معماری ایران، به دلیل تکنیک‌های مختلف ساخت آن، هندسه، میزان خاکریز و نحوه پرکردن نیاز به بررسی دقیق در پژوهش‌های آتی و قضاوت مهندسی در یک بنای خاص وجود دارد: از این رو، اظهار نظر قطعی در این باره نیاز به تحلیل مورد به مورد در کارهای آتی دارد. بلاک (2009) نیز لزوم دقت در این موضوع را مورد بررسی قرار داده است و ذکر می‌کند که در این حالت، باید امکان عبور خط رانش از خاکریز یا سیستم پوشاننده وجود داشته باشد (شکل ۲۰). سایر روش‌ها مانند آجرکاری مجاور قوس، که ارتفاع قوس را کاهش می‌دهند، می‌توانند پایداری لرزه‌ای قوس را افزایش دهند. (در پل‌های تاریخی نیز، خاکریز نقش پایدارکننده بسیار کلیدی در برابر نیروهای ناشی از وزن وسایل نقلیه دارد که در حوزه پژوهش حاضر نمی‌باشد).



تصویر ۱۹: با کاهش خیز قوس از طریق ایجاد خاکریز یا چیدن جداره قوس می‌توان به طراحی ظریف‌تری دست یافت. این امکان‌ها سبب می‌شوند که بتوان قوس با نسبت ضخامت به دهانه کمتر اجرا کرد (Huerta 2006).



تصویر ۲۰: برای پایداری سازه، خط رانش باید بتواند از مصالح مجاور قوس عبور کند (Block 2009).

– توصیه استاندارد ۲۸۰۰ برای قرار دادن کش‌ها در پایه، گرچه راهبرد مفیدی برای جلوگیری از فروریختن مجموعه قوس و پایه در زلزله است، در حالت بررسی این نوشتار، یعنی فروریختن قوس در خود و بدون حرکت پایه، نقشی ندارد و باید راهکارهایی برای پایداری خود قوس، البته با توجه به اثر آن راهکارها بر پایه پیشنهاد گردد.

### نتیجه

در این نوشتار، حد نهایی پایداری لرزه‌ای سه قوس ایرانی در چهارچوب تحلیل حد نهایی با استفاده از مدل پارامتریک خط رانش تعیین شد و نتایج حاصل از آن با نتایج مربوط به مدل‌های فیزیکی مقایسه گشتند. تأثیر عواملی چون نسبت ضخامت به دهانه و خیز قوس بر پایداری لرزه‌ای مورد مذاقه قرار گرفتند و تلاش گردید نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی به‌عنوان معیاری برای سنجش روش تحلیلی مورد توجه قرار گیرند. ضمن اینکه نتایج تحلیلی این نوشتار به‌طور مستقیم، پاسخی به مسئله کاربردی حد پایداری لرزه‌ای سه قوس مورد نظر می‌باشند، در فرایند تجارب تحلیلی و تجربی این نوشتار، بینشی درباره رفتار سازه‌ای قوس‌ها فراهم آمد.

### پژوهش‌های بعدی

بررسی پایداری مجموعه قوس و پایه، با خاکریز و بدون آن می‌تواند محور مناسبی برای پژوهش‌های بعدی باشد.

### پی‌نوشت‌ها

1. Limit State Analysis
2. Cabri II Plus
3. Thrust Line
4. Tilting Ground
5. Force Line
6. Interactive
7. Plastic Analysis
8. Finite Element Method
9. Discrete Element Method

10. Equilibrium Approach

11. Virtual Work Method

12. Thrust Line Analysis

13. Funicular polygon

۱۴. می‌توان با یافتن چندضلعی فونیکولار برای یک دسته از نیروها، سازه‌ای را فرمیابی کرد که میان‌تار آن بر این چندضلعی منطبق باشد. در سازه‌های بنایی مرسوم، بعد از ساختن چنین فرمی به‌صورت واقعی، تحت اثر بارهای متفاوت، سازه علاوه بر مسیر میان‌تار که به‌صورت نظری تعیین شده، مسیرهای نیروی دیگری نیز می‌تواند در خود داشته باشد (نک: Huerta 2001).

15. Effective Thickness

16. Yield

17. Collapse

18. Strength

19. Deflection

20. Stability

21. Sliding

22. Lower Bound Theorem

۲۳. نکتهٔ حائز اهمیت دیگر در این مسیر، تحلیل مبتنی بر جابه‌جایی (Displacement based) به‌جای تحلیل مبتنی بر نیرو (Force based) است. هیمن (1966)، بوئیای (2001) و اوشندورف (2005) اشاره می‌کنند که برخلاف پل‌های بنایی که در معرض بارهای ناشی از عبور وسایل نقلیه هستند، بار وارد بر بام‌های ساختمان‌های بنایی عموماً وزن خود سقف است. از سوی دیگر اوشندورف (Ochsendorf 2004) ذکر می‌کند که بناهای تاریخی بیشتر به‌علت تغییرات هندسی و جابه‌جایی‌هایی ناشی از نشست، رانش و زلزله فرومی‌ریزند تا بارهای وارده. از این‌رو، وی توصیه می‌کند به‌جای اعمال نیرو، در همهٔ تحلیل‌ها، مانند خط رانش و اجزای محدود، به سازهٔ تحت اثر وزن خود، جابه‌جایی اعمال شود. این توصیه با رهاوردهای جدید در تحلیل لرزه‌ای سازه که جابه‌جایی هدف و نه میزان نیرو را معیار طراحی قرار می‌دهند، همسوست.

24. Upper Bound Theorem

25. Scalability

۲۶. نام‌ها و روش‌های ترسیمی دیگری نیز برای این قوس‌ها ذکر شده‌اند که بحث دربارهٔ اعتبار این نام‌گذاری‌ها و روش‌ها در حوصلهٔ این مقاله نیست و تنها به یک روش استناد داده شده است.

۲۷. این قوس به شبدری نیز موسوم است.

28. Macro

29. Initial Objects

30. Final Object

31. Snap

۳۲. مفصل در نقاط مشخص شده تشکیل شده است. ترسیم خط رانش نازک‌تر به دلایل شرایط گرافیکی نرم‌افزار مقذور نیست و در نقاطی غیر از نقاط مشخص شده، با وجودی نزدیکی بصری خط رانش به آن‌ها، مفصل تشکیل نشده است. اما این امکان وجود دارد که با خطای ساخت در یک قوس واقعی، مفصل پلاستیک به یکی از نقاط نزدیک منتقل شود؛ هرچند که این امر در پایداری کلی قوس تأثیری ندارد.

33. Crushing

منابع

- ایزدپناه، فرزین. ۱۳۹۷. تحلیل مبانی هندسی سازه در طول‌ماهرهای طراحی معماری ایران. چهارمین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار.
- \_\_\_\_\_. ۱۳۹۳ الف. نکته‌ای درباره قوس‌های خفته تیزه‌دار. همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار. همدان.
- \_\_\_\_\_. ۱۳۹۳ ب. تحلیل خط فشار: پیشینه و دستاوردهای جدید. همایش ملی عمران، معماری و توسعه نوین شهری. تبریز.
- ایمانی، نادیه. ۱۳۷۸. تحلیل ساختار قوس ایوان غربی مسجد جامع ساوه. دومین کنگره تاریخ معماری و شهرسازی. ج ۴: ۶۰۱-۵۶۷
- آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰. ۱۳۹۷. تهران: مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی.
- بیکر، ج. و ژ. هیمن. ۱۳۹۱. طرح و تحلیل پلاستیک قاب‌ها. جلد اول: اصول و مفاهیم. ترجمه علی کاوه. تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران.
- تیموشنکو، س. پ. و د. ه. یانگ. ۱۳۷۳. تئوری ساختمان‌ها. ترجمه تیمور توکلی هسجین و جواد مقصود. ج ۳. تهران: دانشگاه تهران.
- چینی، جزیه. ۱۳۸۳. پایدارکردن سازه‌های آجری: فن‌های مداخله. ترجمه سعید ایرانفر. تهران: سازمان عمران و بهسازی شهری.
- حیدری، داریوش. ۱۳۸۱. تحلیل تاق‌های بنایی. نشریه تخصصی مرمت معماری رف ۱ (۲): ۱۹-۲۳.
- زم‌رشیدی، حسین. ۱۳۷۳. طاق و قوس در معماری ایران. تهران: کیهان.
- هیمن، ژ. ۱۳۷۳. طرح و تحلیل پلاستیک سازه‌ها (کاربردها). ترجمه علی کاوه و عباس مختارزاده. تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران.
- Allen Edward and et al. 2010. *Form and Forces*. New Jersey: Willey and sons.
- Block, Ph. 2009. *Thrust Network Analysis-Exploring Three-dimensional Equilibrium*, Doctor of Philosophy in Architecture. Massachusetts Institute of Technology.
- Block, Ph., M.J. DeJong and J. Ochsendorf. 2006. As Hangs the Flexible Line :Equilibrium of Masonry Arches. *Nexus network journal* 8 (2): 13-24.
- oothby, T. 2001. Analysis of masonry arches and vaults. *Progress in Structural Engineering and Material* (3): 246-256.
- Clemente, P. 1998. Introduction of stone arches. *Int. J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 27(): 513-522.
- De Jong, M.J. 2009. *Seismic assessment strategies for Masonry Structures*. Ph.D. Thesis. Massachusetts institute of technology.
- De Jong, M.J., Laura De Lorenzis and Stuart Adams. 2008. Rocking stability of masonry arches in seismic regions. *Earthquake spectra* 24 (4): 847-865.
- Heyman, J. 1966. The Stone Skeleton. *Int. J. of Solids Structures* (2): 249-279.
- Huerta, S. 2006. Galileo Was Wrong: The Geometrical Design of Masonry Arches. *Nexus Network journal* 8 (2): 25-51.
- Huerta, S. 2001. Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach. *Historical Constructions*, P.B. Lourenço, and P. Roca (Eds.): 47-70.
- Mery E. 1840. Sur l'équilibre des voûtes en berceau. *Annales des Ponts et Chaussées*: 50-70.
- Ochsendorf, J. 2005. *Collapse of masonry structure*. Ph.D. Thesis. Cambridge University.

- ----- . 2004. A displacement-based approach for the safety assessment of masonry structure. *Proceedings of the forth international seminar on structural analysis of historical construction*, Padova, Italy: 10-13
- Romano, Al. 2005. *Modeling, Analysis and Testing of Masonry Structures*. Doctoral Thesis. Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Ingegneria.
- Shapiro, E. E. 2010. *Collapse Mechanisms of Small-Scale Unreinforced Masonry Vaults*. M.Sc. thesis in building technology. Massachusetts Institute of Technology.