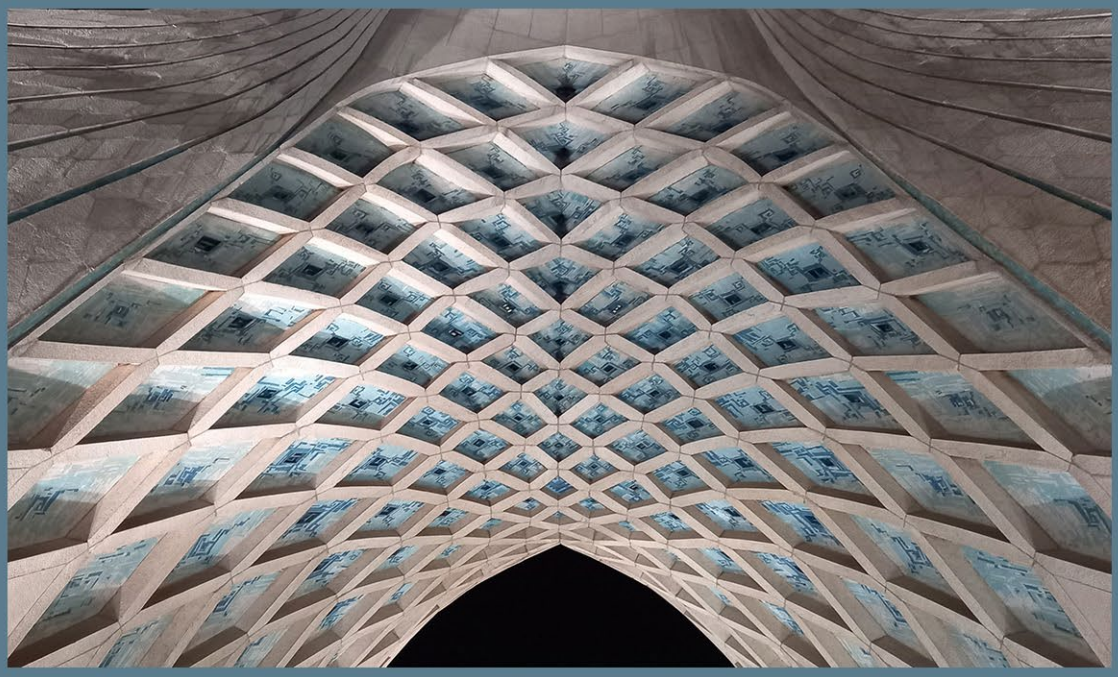
مطالعات معماری ایران ۲۹

دوفصلنامه علمی دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان

سال پانزدهم، شماره ۲۹، بهار و تابستان ۱۴۰۵



◆ تاریخ‌شناسی معماری مسجد جامع آمل و نسبت آن با شهر در سده‌های نخست هجری
● ذات‌الله نیک‌زاد

◆ بازتعریف محدودهٔ قیصریه در بازار کاشان و شکل‌گیری یک مرکز جدید شهری در نیمهٔ دوم دورهٔ قاجاریه
● یاسمن صفیان/ حمیدرضا جیحانی/ سید محمود سادات

◆ سنجش ارزش‌های قلعه‌رودخان به‌عنوان میراث جهانی از منظر منشور ایکوفورت و دستورالعمل اجرایی کنوانسیون میراث جهانی
● ابوذر جانعلی‌پور/ پیروز حناچی/ محمدحسن طالبیان

◆ بهبود حد نهایی پایداری جانبی سازهٔ یک دهانهٔ متشکل از طاق‌آهنگ بر روی پایه در صفحهٔ قوس
● فرزین ایزدپناه

◆ ارزیابی عملکرد پوستهٔ مشبک آجری در کنترل تابش و نور در اقلیم گرم و نیمه‌خشک دزفول
● کلثوم کامکار/ کورش مؤمنی/ اکبر موسی ئی جو

◆ از باغ به میدان: ظهور نرده و آشکار شدن فضای سلطنتی در شهر عصر ناصری
● کاوه رشیدزاده/ گلنار حکمت

◆ بررسی هندسی جلوه‌های گره‌چینی در نمونه‌های تاریخی ایران به روش الگوریتمی
● مهدی عزیزی همدانی/ مجتبی ثابت‌فرد

◆ ابعاد و ویژگی‌های مفهومی استدلال حدسی در عمل طراحی
● علی قریشوندی ابراکی/ علی علائی/ کیوان جورابچی/ سعید نوروزیان ملکی

◆ نقش پیکره‌بندی فضا در ایجاد اجتماع‌پذیری مراکز تجاری شهر اصفهان با مقیاس اجتماعی
● مریم گروهی/ نرگس دهقان/ منصوره کیان‌ارثی/ سمیه رفیعی

◆ ارزیابی پراگماتیک: فرصتی برای اصلاح سیاست‌ها و رویه‌های مداخله در محدوده‌های هدف (مورد انضمامی: سندملی بازآفرینی)
● مرتضی‌هادی جابری‌مقدم/ شیما سقندلی

◆ از رویدادسازی تا شخصیت‌پردازی موزه‌یادمان‌ها
● فائزه تفرشی/ منوچهر معظمی/ نیکلاس وایز

◆ اثر حذف درختان کهن‌سال در معماری معابر ایلام بر تغییر آسایش حرارتی عابران براساس دینامیک سیالات محاسباتی CFD
● کارن فتاحی/ نسرین سیاوش

مطالعات معماری ایران

دوفصلنامه علمی دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان

سال پانزدهم، شماره ۲۹، بهار و تابستان ۱۴۰۵
صاحب امتیاز: دانشگاه کاشان
مدیر مسئول: دکتر علی عمرانی‌پور
سردبیر: دکتر غلامحسین معماریان
مدیر داخلی: دکتر بابک عالمی

هیئت تحریریه (به‌ترتیب الفبا):
دکتر عباس اکبری. دانشیار دانشگاه کاشان
دکتر حمیدرضا جیحانی. دانشیار دانشگاه شهید بهشتی
دکتر پیروز حناچی. استاد دانشگاه تهران
دکتر شاهین حیدری. استاد دانشگاه تهران
دکتر مارکوس ریتر. استاد دانشگاه وین
دکتر محمدصادق طاهر طلوع دل. دانشیار دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
دکتر بابک عالمی، دانشیار دانشگاه کاشان
دکتر علی عبد الرئوف. استاد دانشگاه حمد بن خلیفه قطر
دکتر علی عمرانی‌پور. دانشیار دانشگاه کاشان
دکتر فاطمه کاتب. استاد دانشگاه الزهرا (س)
دکتر حسین کلانتری. استاد جهاد دانشگاهی
دکتر اصغر محمد مرادی. استاد دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر غلامحسین معماریان. استاد دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر محسن نیازی. استاد دانشگاه کاشان

درجه علمی پژوهشی دوفصلنامه مطالعات معماری ایران طی نامه شماره ۱۶۱۶۷۶ مورخ ۱۳۹۰/۰۸/۲۱ دبیرخانه کمیسیون نشریات علمی کشور، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ابلاغ گردیده است.

پروانه انتشار این نشریه به شماره ۹۰/۲۳۰۳۰ مورخ ۹۱/۹/۷ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی صادر شده است.

این نشریه حاصل همکاری مشترک علمی دانشگاه کاشان با دانشکده معماری دانشگاه تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشگاه الزهرا (س)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه شهید رجایی، پژوهشکده فرهنگ، هنر و معماری جهاد دانشگاهی و انجمن علمی انرژی ایران است.

نشریه مطالعات معماری ایران در پایگاه استنادی علوم کشورهای اسلامی (ISC)، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، پایگاه مجلات تخصصی نور (noormags.ir)، پرتال جامع علوم انسانی (ensani.ir) و بانک اطلاعات نشریات کشور (magiran.com) نمایه می‌شود.

تصاویر بدون استناد در هر مقاله، متعلق به نویسنده آن مقاله است.

(نسخه الکترونیکی مقاله‌های این مجله، با تصاویر رنگی در تارنمای نشریه قابل دریافت است.)

عکس روی جلد: علی عمرانی‌پور
(بنای میدان آزادی)

ویراستار ادبی فارسی: معصومه عدالت‌پور
همکار اجرایی: فائزه تفرشی

دورنگار: ۵۵۹۱۳۱۳۲-۰۳۱

نشانی دفتر نشریه: کاشان، بلوار قطب راوندی، دانشگاه کاشان، دانشکده معماری و هنر، کدپستی: ۵۳۱۵۳-۸۷۳۱۷

رایانامه: j.ir.arch.s@gmail.com
پایگاه اینترنتی: jias.kashanu.ac.ir

شاپای الکترونیکی: ۵۰۲۰-۲۶۷۶

فهرست

۵ **تاریخ‌شناسی معماری مسجد جامع آمل و نسبت آن با شهر در سده‌های نخست هجری**
ذات‌الله نیک‌زاد

۲۵ **بازتعریف محدودهٔ قیصریه در بازار کاشان و شکل‌گیری یک مرکز جدید شهری در نیمهٔ دوم دورهٔ قاجاریه**
یاسمن صفیان/ حمیدرضا جیحانی/ سید محمود سادات

۵۷ **سنجش ارزش‌های قلعه‌رودخان به‌عنوان میراث جهانی از منظر منشور ایکوفورت و دستورالعمل اجرایی کنوانسیون میراث جهانی**
ابوذر جانعلی‌پور/ پیروز حناچی/ محمدحسن طالبیان

۸۵ **بهبود حد نهایی پایداری جانبی سازهٔ یک دهانهٔ متشکل از طاق‌آهنگ بر روی پایه در صفحهٔ قوس**
فرزین ایزدپناه

۱۰۹ **ارزیابی عملکرد پوستهٔ مشبک آجری در کنترل تابش و نور در اقلیم گرم و نیمه‌خشک دزفول**
کلثوم کامکار/ کورش مؤمنی/ اکبر موسی ئی جو

۱۳۷ **از باغ به میدان: ظهور نرده و آشکار شدن فضای سلطنتی در شهر عصر ناصری**
کاوه رشیدزاده/ گلنار حکمت

۱۶۱ **بررسی هندسی جلوه‌های گره‌چینی در نمونه‌های تاریخی ایران به روش الگوریتمی**
مهدی عزیزی همدانی/ مجتبی ثابت‌فرد

۱۷۹ **ابعاد و ویژگی‌های مفهومی استدلال حدسی در عمل طراحی**
علی قریشوندی آبراکی/ علی علائی/ کیوان جورابچی/ سعید نوروزیان ملکی

۲۰۵ **نقش پیکره‌بندی فضا در ایجاد اجتماع‌پذیری مراکز تجاری شهر اصفهان با مقیاس اجتماعی**
مریم گروهی/ نرگس دهقان/ منصوره کیان‌ارثی/ سمیه رفیعی

۲۲۹ **ارزیابی پراگماتیک: فرصتی برای اصلاح سیاست‌ها و رویه‌های مداخله در محدوده‌های هدف (مورد انضمامی: سندملی بازآفرینی)**
مرتضی‌هادی جابری‌مقدم/ شیما سقندلی

۲۵۳ **از رویدادسازی تا شخصیت‌پردازی موزه‌یادمان‌ها**
فائزه تفرشی/ منوچهر معظمی/ نیکلاس وایز

۲۷۳ **اثر حذف درختان کهن‌سال در معماری معابر ایلام بر تغییر آسایش حرارتی عابران براساس دینامیک سیالات محاسباتی CFD**
کارن فتاحی/ نسرین سیاوش

۲۹۵ **بخش انگلیسی**

بهبود حد نهایی پایداری جانبی سازهٔ یک دهانهٔ متشکل از طاق‌آهنگ بر روی پایه در صفحهٔ قوس

علمی‌پژوهشی

فرزین ایزدپناه*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۱۹

چکیده

پیکره‌بندی عمودی، نحوهٔ توزیع جرم در مقطع سازه‌های بنایی متشکل از طاق و دیوار بر مهم‌ترین حالت فروریختگی این سازه، یعنی دوران عمود بر صفحهٔ دیوار، اثر کلیدی دارد. هدف نوشتار حاضر این است که با طراحی پیکره‌بندی مناسب برای یک گونه از سازه‌های روستایی یک دهانهٔ مرسوم، متشکل از طاق‌آهنگ بر روی پایه، حد نهایی پایداری لرزه‌ای این سازه‌ها را برای این حالت کلیدی فروریختگی ارتقا بخشد. برای این کار، نخست، اثر سه تکنیک استادکاران سنتی برای پایدارسازی، یعنی ضخامت دادن به پای قوس، استفاده از پایهٔ با یک برِ شیب‌دار و به کار بردن سکو یا پیرنشین بر افزایش پایداری لرزه‌ای بررسی می‌شود؛ سپس، با استفاده از این سه تکنیک و تکنیک مشهور دیگر در پیشینه، یعنی تغییر زاویهٔ قطاع قوس، تلاش می‌شود که حد پایداری جانبی گونهٔ مورد بررسی که در وضع موجود، در منطقهٔ بررسی‌شده، زیر ۰/۱ شتاب ثقل است، بدون تسلیح، به‌ترتیب به ۰/۳۵، ۰/۵۰ و ۰/۶۵ شتاب ثقل افزایش یابد. همچنین، مساحت مقطع‌های طراحی‌شده برای مقایسه و انتخاب گزینه‌های بهینه، هم‌زمان با شکل مقطع پیشنهادی برای مشاهدهٔ ویژگی‌های بصری ارائه می‌شوند. تحلیل و طراحی براساس روش حد نهایی براساس فرض‌های هیمن است و ابزار مورد استفاده چندضلعی فونیکولار می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که حدود پایداری مورد نظر این نوشتار، با استفاده از تکنیک‌های بومی بررسی‌شده، قابل حصول هستند. در میان این تکنیک‌ها، استفاده از دیوار با برِ بیرونی شیب‌دار در اغلب نسبت‌ها، صرفاً برای بهینه‌سازی و در برخی دیگر، برای هر دو هدف، بهینه‌سازی و افزایش حد پایداری لرزه‌ای مفید است. پاسخ حد بالای سازه به سایر تکنیک‌ها حساسیت بالایی دارد و تعیین نسبت‌های هندسی مناسب راهکار مناسبی در ارتقای رفتار سازه است. حاصل پژوهش به‌صورت یک دستنامهٔ طراحی ارائه می‌شود که می‌تواند برای طراحی اولیه مورد استفادهٔ طراحان قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها:

پیکره‌بندی سازهٔ با مصالح بنایی، پایداری لرزه‌ای، مجموعهٔ قوس و پایه، طراحی در حالت حد نهایی.

* استادیار، دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، fzizadpanah@yahoo.com

مطالعات معماری ایران
دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۹ ـ بهار و تابستان ۱۴۰۵
صفحات ۱۰۷-۸۵ ۸۵

پرسش‌های پژوهش

۱. چگونه و به چه میزان می‌توان با اصلاح پیکره‌بندی مقطع، حد پایداری بناهای روستایی[۱] متشکل از طاق‌آهنگ بر روی دیوار را در مکانیسم فروریختگی عمود بر صفحهٔ دیوار، بدون تسلیح یا دوربندی ارتقا بخشید؟

۲. چه گزینه‌های طراحی بهینه‌ای می‌توان برای حد پایداری لرزه‌ای مناسب‌تر نسبت به شرایط موجود، برای بناهای ذکرشده پیشنهاد کرد؟

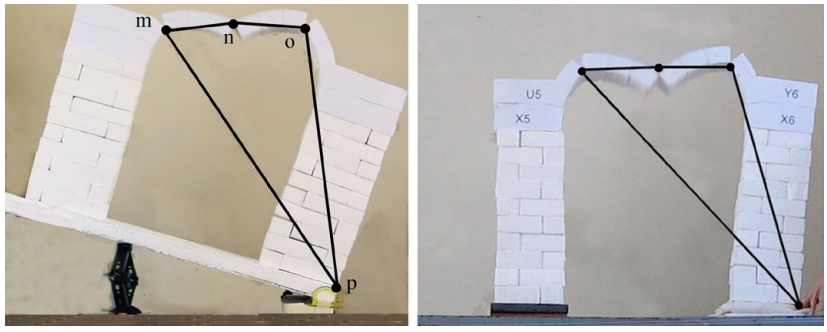
مقدمه

برای تداوم معماری روستایی، نیاز به طراحی و اصلاح «موجه» پیکره‌بندی[۲] خانه‌ها به‌گونه‌ای که دارای پایداری لرزه‌ای لازم و قابل پیش‌بینی باشند، احساس می‌شود. به برخی از مسائلی که امروزه باعث آسیب‌پذیری این سازه‌ها می‌شوند، در ذیل اشاره می‌شود. نخست، گرچه روش‌هایی برای تسلیح و دوربندی سازه‌های با مصالح بنایی پیشنهاد شده که پایداری لرزه‌ای مسکن‌های بومی را تضمین می‌کنند، به دلیل‌های مختلف چون عدم آگاهی، گرانی فولاد، دشواری دسترسی به مصالح و صعب‌العبور بودن برخی مناطق روستایی این روش‌ها در عمل به کار نمی‌روند و درنتیجه، پیکره‌بندی نامناسب هندسی بناها منجر به آسیب‌پذیری مضاعف آن‌ها می‌شود. باید دقت نمود که برخی از این دلیل‌ها موجه هستند؛ برای مثال، زیربنای مسکن‌های پیشنهادی دولتی پایدار در برابر زلزله در مناطق لرزه‌خیز کشور مانند استان کرمان، در برخی روستاها، کمتر از نصف زیربنای موجود یک خانهٔ روستایی سنتی است[۳] که پذیرش این طرح‌ها را ازنظر کارکردی، روانی و اجتماعی دشوار می‌کند. نکتهٔ دیگر اینکه پژوهش‌هایی چون Nienhuys (2010) نشان می‌دهند در مناطق بومی، به‌دلیل از دست رفتن فرهنگ معماری بومی، ساخت‌وسازهای جدید مردم محلی در معرض آسیب بیشتری نسبت به بناهای گذشته هستند که گرچه در قالب مهندسی مدرن طراحی نشده بوده‌اند، یک سنت ساخت چندقرنی آن‌ها را پشتیبانی می‌کرده است. در معماری امروزه روستایی ایران، نیز چنین مشکلاتی مشاهده می‌شوند؛ برای مثال، در برخی مناطق، سازندگان به‌زعم اینکه استفاده از دیوارهای لاغر با بلوک بتنی با مقاومت بیشتر و بدون تسلیح به‌جای دیوارهای ضخیم سنتی آجری مناسب‌تر است، این سازه‌ها را در مهم‌ترین مسئلهٔ خود که پایداری کلی می‌باشد، تضعیف می‌کنند. این نکته، معضل دیگری است که نیاز به اصلاح طراحی را متذکر می‌شود. نکتهٔ آخری که باید اضافه نمود این است که حتی پیش از تصمیم برای تسلیح نیز، منطقی است که ساختمان دارای پیکره‌بندی مناسب باشد؛ به تعبیر مارتی و همکاران (Murty et al. 2012) اگر بنایی دارای پیکره‌بندی مناسب باشد حتی یک محاسب و طراح سازهٔ ضعیف نیز نمی‌تواند به پایداری سازه‌ای آن لطمهٔ چندانی بزند. مسائل ذکرشده نیاز به طراحی موجه پیکره‌بندی این سازه‌ها را گوشزد می‌کنند.

در مسیر جست‌وجوی این طراحی موجه، یونسکو (Arya 1987) پیشنهاد معقولی برای برنامهٔ پایدار سازی بناها دارد که طی آن با توجه به شرایط اقتصادی و اجرایی جامعهٔ بومی، هدف‌هایی در سطوح مختلف برای کارکرد لرزه‌ای بناها پیش‌بینی شوند. در این روش، ساختار بناها براساس کارکرد لرزه‌ای در سطوح نامناسب، نسبتاً مناسب و مناسب دسته‌بندی می‌شوند و تلاش می‌شود بسته به امکان‌های موجود، سطح کارکرد را ازطریق طراحی و یا پایدارسازی ساختمان‌های موجود، مرحله‌به‌مرحله به سطح مناسب‌تر منتقل نمود. در این صورت، گرچه نمی‌توان هدف حداکثری را برای سازه‌ها تأمین نمود، می‌توان با «مدیریت ریسک»، میزان خسارت‌های مالی و جانی را کاهش داد.

یکی از راه‌های ارتقای شرایط موجود استفاده از روش‌های مرسوم در تجربهٔ معماری بومی است. در طول تاریخ معماری راهکارهای سازه‌ای توسط استادکاران بومی مورد استفاده بوده که ماندگاری آن‌ها بیانگر مناسبتشان از منظرهای مختلف است. ازاین‌رو، پس از آزمون «قابلیت احتمالیِ» آن‌ها در افزایش حد پایداری لرزه‌ای، این راهکارها می‌توانند در طراحی مورد استفاده قرار گیرند. باید توجه داشت که اسناد تاریخی در مورد دانش استادکاران سنتی ایران دربارهٔ زلزله ارائه نشده‌اند. نوشتار حاضر نیز در پی یک پژوهش تاریخی نیست و این ادعا طرح نمی‌شود که راهکارهای مورد استفادهٔ

استادکاران که در نوشتار حاضر طرح می‌شوند «برای مقابله با زلزله» بوده‌اند.[۴] اما می‌توان گفت که مسئلهٔ نشست و مهار رانش قوس و ناپایداری ناشی از آن موضوعی مشهور در تاریخ معماری بوده است: پژوهشگران تاریخ معماری و ساخت، مانند هورتا (Huerta 2001; 2006)، مستندهایی دراین‌باره ذکر کرده‌اند. چیزی که دانش در این مطلب اخیر را برای هدف نوشتار حاضر حائز اهمیت می‌سازد، برخی مشابهت‌های میان ناپایداری ناشی از نشست و زلزله[۵] است (تصویر ۱)، که سبب این گمانه‌زنی می‌شوند که راهکارهای استادکاران برای مقابله با نشست و کنترل رانش برای مقابله با زلزله نیز مطلوب باشند.



تصویر ۱: مکانیسم فروریختگی مجموعهٔ قوس و پایه با ایجاد سه مفصل در قوس و یک مفصل در پایه که همراه با شکست مایل پایه رخ داده است. راست: ناشی از نشست؛ چپ: ناشی از زلزله. تصویر (ایزدپناه و حجت ۱۴۰۰)

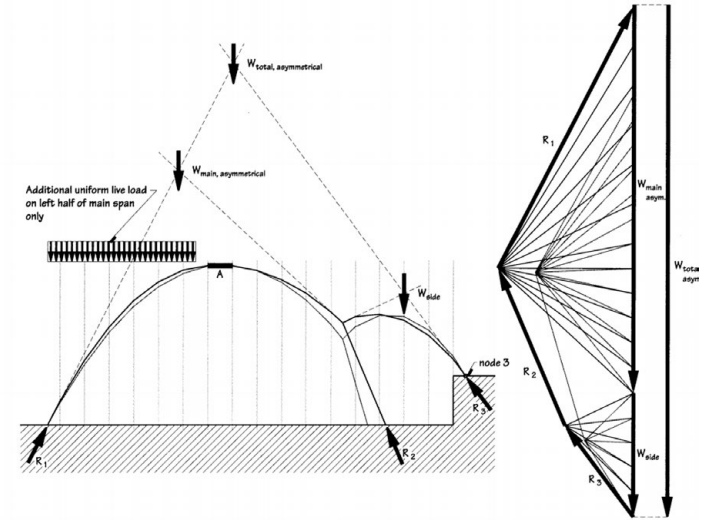
در جمع‌بندی مطالب ذکر شده، می‌توان گفت که یافتن پاسخ‌هایی برای طراحی مناسب‌تر پیکره‌بندی با استفاده از برخی راهکارهای هندسی اتخاذشده توسط استادکاران سنتی برای کنترل رانش و نشست، می‌تواند در افزایش پایداری لرزه‌ای و تداوم معماری روستایی حائز اهمیت باشد.

۱. پیشینهٔ پژوهش

با توجه به اینکه هدف پژوهش حاضر پیشنهاد مصادیق واقعی طراحی است، لازم است که پیشینهٔ اثرگذار در چند حوزه بررسی شود: نخست، تاریخچهٔ طراحی‌های انجام‌شدهٔ قبلی مرتبط با روش طراحی نوشتار جاری، نکتهٔ دوم کارهای تحلیلی مرتبط مانند بررسی عناصر سازه‌ای اثرگذار بر طراحی و درنهایت، پژوهش‌های قبلی درزمینهٔ اعتبارسنجی روش طراحی پژوهش حاضر که حدود اعتبار طرح‌های ارائه‌شده را مشخص می‌کنند.

نخستین‌بار، رابرت هوک (۱۶۳۵_۱۷۰۳م) مشابهت مسیر نیروها در قوس فشاری و زنجیر آویخته را طرح کرد و مبنایی برای طراحی و تحلیل سازه‌های فشاری مبتنی‌بر چندضلعی فونیکولار ارائه نمود (Block, DeJong, and Ochsendorf 2006). گرچه پیش از وی، معماران رنسانس از آویختن زنجیر برای فرم‌یابی قوس‌ها استفاده می‌کرده‌اند، نخستین‌بار، هوک بیان نمود که «همان‌گونه که یک ریسمان آویخته ایستا است، معکوس آن یک قوس ایستا می‌باشد»[۶] (Ibid). ایدهٔ وی با گسترش استاتیک ترسیمی، قرن‌ها معیاری برای طراحی سازه‌های گوناگون فراهم نموده است. گائودی (۱۸۵۲_۱۹۲۶م) معمار اسپانیایی ازجملهٔ طراحانی بود که ایدهٔ زنجیرهٔ آویختهٔ هوک را برای طراحی مورد استفاده قرار داده است. نخستین‌بار، هیمن (Heyman 1966) این شیوهٔ طراحی و تحلیل سازه‌های طاقی متشکل از بلوک‌های صلب را در چهارچوب نظری طرح و تحلیل مومسان صورت‌بندی کرده است: وی با سه فرض مشهور به نام خود، *مقاومت فشاری مناسب*، *مقاومت کششی صفر* و *اصطکاک کافی برای جلوگیری لغزش*، مسئلهٔ اصلی سازه‌های طاقی بنایی را *پایداری کلی* به‌جای *کنترل تنش‌ها* طرح نمود (Ibid)[۷]. برای طراحی در مقابل نیروهای جانبی، کلمنته (Clemente 1998) مبنایی را برای یافتن شرایط تعادل سازه‌های متشکل از بلوک‌های صلب به روش استاتیکی معادل پیشنهاد کرده است: در منابع فارسی، ایزدپناه و علمداری (۱۴۰۳) شرحی از روش وی ارائه می‌دهند. برای طراحی،

استفاده از ابزاری که امکان کنترل هم‌زمان فرم و نیروها را فراهم کند، کارآمدتر از یک روش عددیِ غیربصری است. پس از حدود یک قرن فراموشی روش‌های حل و طراحی ترسیمی سازه‌ها در قالب استاتیک گرافیکی، پژوهشگرانی چون آلن و همکاران (Allen et al. 2010)، در انتهای قرن بیستم میلادی، متوجه قابلیت این روش‌ها شدند. آن‌ها با تلفیق این روش‌ها با امکان‌های رایانه‌ای، فضایی را برای طراحی و کنترل هم‌زمان فرم و نیروها فراهم آورده‌اند. در این روش، بازنمایی تعادل بلوک‌های صلب ازطریق خطرانش یا چندضلعی فونیکولار انجام می‌گیرد که در نرم‌افزارهای با قابلیت پارامتریک قابل ترسیم و کنترل است. بلاک و اوشندورف[۸] (Ibid) با این روش به طراحی دوبعدی در مقطع سازه پرداخته‌اند که گرچه بارهای نامتقارن قائم را نیز در بر می‌گیرد، نیروهای جانبی در آن لحاظ نمی‌شوند (تصویر ۲). مارتین سِیز و هررا (Martín-Sáiz and Herrera 2025) برای طراحی قوس با منحنی فونیکولار در برابر نیروی جانبی از روش تطبیق زنجیرهای فونیکولار استفاده کرده‌اند. ریچ[۹] (Allen et al. 2010) مستقیماً به سراغ روش فونیکولار سه‌بعدی رفته و به طراحی یک مسکن بومی در آفریقا، منحصراً برای بارهای قائم پرداخته‌اند. طرح آن‌ها در محیط نرم‌افزاری راینو والت[۱۰] انجام پذیرفته که به‌رغم قابلیت در ایجاد فرم‌های فشاری سه‌بعدی خلاقانه، برای طراحی در برابر نیروهای جانبی قابل استفاده نبوده است. (این ضعف تاکنون نیز در نرم‌افزار برطرف نشده است.)



تصویر ۲: طراحی فونیکولار برای بارگذاری نامتقارن قائم (Allen et al. 2010)

پژوهشگرانی چون اوپنهایم (Oppenheim 1996)، اوشندورف (Ochsendorf 2005) و بلاک (Block 2003)[۱۱] به روش‌های مختلف چون کار مجازی، معادله‌های تعادل (عددی) و خط رانش (چندضلعی فونیکولار) به توسعهٔ روش و تحلیل عناصر سازه‌ای اثرگذار و سازه‌های موجود پرداخته‌اند. اوشندورف، مبانی تحلیل پایهٔ قوس را بررسی کرده است. وی حد پایداری مجموعهٔ قوس و پایه را برای تناسبات کلیساهای اروپایی در زلزله بررسی کرده است (Ochsendorf 2005). ایزدپناه و علمداری[۱۲] (۱۴۰۳) به بررسی همین مسئله برای مجموعهٔ قوس و پایه در تناسبات مرسوم معماری ایران پرداخته و نتایج را با استفاده از مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس بررسی کرده‌اند. دو پژوهش اخیر، تنها پایهٔ با مقطع مستطیلی و افزایش ارتفاع دیوار در مجاورت شانهٔ قوس را مورد بررسی قرار داده‌اند. پژوهش‌های ذکرشده در حوزهٔ تحلیلی برخی از داده‌های مورد نیاز برای شروع طراحی را فراهم می‌آورند. روش‌های تحلیلی آن‌ها امکان بررسی سایر حالات برای عناصر را فراهم می‌کنند که در این پژوهش از آن‌ها استفاده خواهد شد.

برای تعیین حدود اعتبار پاسخ‌های روش تحلیلی حاضر و میزان شتاب جانبی معیار طراحی، پژوهش‌هایی انجام شده‌اند. در تحلیل لرزه‌ای با روش استاتیکی معادل، فرض شده که نیروی جانبی در زمان بی‌نهایت به سازه وارد می‌شود،

که فرضی محافظه‌کارانه است. دی‌یونگ (De Jong 2009) نشان می‌دهد با میل کردن زمان اعمال نیرو به صفر، سازه می‌تواند نیروهای بزرگ‌تری را نسبت به حالت نیروی استاتیکی معادل، در زمان بی‌نهایت، تحمل کند. مایکلز (Michiels 2018) نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی در تحلیل اجزای منفرد غیرخطی، برای نمونهٔ بررسی‌شده، حدود ۵۰ درصد بالاتر از حالت تحلیل و طراحی استاتیکی معادل است. با این تجربه، وی پیشنهاد می‌دهد که برای اجتناب از ضخیم شدن اعضا و غیراقتصادی شدن طرح، بیشینهٔ شتاب طراحی با روش استاتیکی معادل به شتاب مبنای طرح محدود شود. همچنین، مارتین سِیز و هررا (Martín-Sáiz and Herrera 2025) محدودهٔ بیشینهٔ شتاب جانبی طراحی را در فاصلهٔ ۰/۳۵ تا ۰/۵ برابر شتاب ثقل پیشنهاد می‌دهند. لی و همکاران (Li et al. 2021) و میسری و همکاران (Misseri, DeJong, and Rovero 2018) نشان داده‌اند که خطاهای تحلیل حد نهایی به نقص در فرض اصطکاک بالای بین مصالح، حساس هستند، اما اثر نقصان در شرط مقاومت فشاری مناسب بر پاسخ نهایی قابل اعتنا نیست.

با توجه به تمرکز پیشینه بر تحلیل و خلأ در «طراحی مناسب‌تر در برابر نیروی جانبی» و براساس «فرم‌های سادهٔ مرسوم در معماری روستایی» نیاز به پژوهشی دراین‌باره احساس می‌شود. پژوهش حاضر مقطع‌هایی را برای حد پایداری جانبی مشخص در حالت استاتیکی معادل براساس روش پیشنهادی کلمنته (Clemente 1998) مطالعه کرده و پیشنهادهایی برای طراحی ارائه داده است. انتخاب طراحی بنا در مقطع موازی صفحهٔ قوس، به‌دلیل اهمیت بالای حالت فروریختگی عمود بر صفحهٔ دیوار است. ازاین‌رو، تحلیل به‌صورت دوبعدی در مقطع بنا انجام می‌شود. طرح‌های پیشنهادی در این نوشتار برای حد شتاب جانبی در ۰/۳۵، ۰/۵ و ۰/۶۵ برابر شتاب ثقل ارائه می‌شوند. پیش از ورود به طراحی، نخست، رفتار عناصر سازه‌ای، پایه و قوس را به‌منظور افزایش پایداری مرور می‌کنیم تا مشخص شود چه امکان‌هایی برای طراحی فراهم می‌کنند. سپس، رفتار مجموعهٔ سازه حاصل از اندرکنش اعضای فوق و طراحی را بررسی می‌کنیم. برای طراحی عناصر و کلیت سازهٔ مورد نظر یک سری نمودار و جدول قابل استفاده به‌صورت دست‌نامه استخراج می‌شوند. گزینه‌های متفاوتی برای طراحی پیشنهاد می‌شوند و مساحت‌های مقطع آن‌ها نیز به‌عنوان معیاری برای انتخاب بهینه ارائه می‌شوند.

در استفاده از نتایج پژوهش حاضر، باید نکات و محدودیت‌هایی مورد توجه قرار گیرند. نخست آنکه سایر ضوابط هندسی کلی دربارهٔ هندسهٔ پلان، مانند توزیع مناسب جرم و سختی در پلان، تقارن، و ضوابط مرتبط با شرایط بازشوها در دیوارهای موازی زلزله، مانند طول و مساحت بازشو که در منابعی مانند (آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزلهٔ ۱۳۹۷) طرح شده‌اند، به قوهٔ خود باقی هستند و پژوهش حاضر بر روی مقطع بنا متمرکز است. نکتهٔ دیگر اینکه پاسخ‌های این نوشتار در مرحلهٔ بعدی باید توسط روش تحلیلی دیگری که اثر کاهندهٔ لغزش احتمالی میان بلوک‌ها را بر پاسخ در نظر می‌گیرد، بررسی شوند. اضافه بر آن، برای بهره‌گیری از اثر مثبت محدودیت زمانی اعمال نیروی جانبی بر پاسخ، یک تحلیل دینامیکی غیرخطی لازم است.

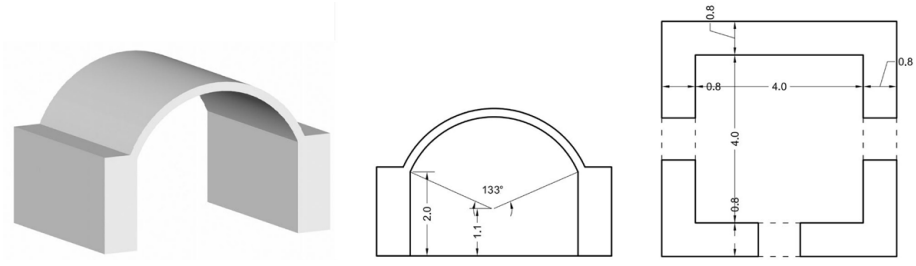
۲. روش پژوهش و تحلیل

این نوشتار در چهارچوب طرح و تحلیل مومسان سازه‌ها، با فرض‌های هیمن و تحلیل در حالت حد نهایی حرکت می‌نماید. وجود یک حالت تعادل در قوس طبق قضیهٔ حد پایینِ تحلیل مومسان یا «قضیهٔ ایمن» نشان می‌دهد که سازه پایدار خواهد ماند. درصورتی‌که تنها یک مسیر نیرو در سازه باقی بماند که سازه با این مسیر منحصربه‌فرد در آستانهٔ فروریختن باشد، طبق قضیهٔ حد بالا، یا «قضیهٔ ناایمن»، سازه به حد بالای پایداری سازه‌ای خود رسیده است.

مسیر متعادل در تحلیل گرافیکی چندضلعی فونیکولار فشاری است که باید در مقطع قوس قرار گیرد. برای یافتن مسیر نیروی فشاری تحت اثر شتاب ثابت افقی و وزن، از روش دوران خط نیروی فونیکولار استفاده شده است. در این حالت، حاصل‌ضرب تانژانت زاویهٔ دوران در شتاب ثقل، شتاب جانبی را نشان می‌دهد (برای شرح کامل روش تحلیل ر.ک: ایزدپناه و علمداری ۱۴۰۳). در این نوشتار، طراحی برای حد بالا انجام خواهد شد. بدین‌ترتیب، در تحلیل‌های انجام‌شده، آستانهٔ فروریختگی و حداقل مقطع برای شتاب جانبی مورد نظر ارائه شده‌اند.

۳. شرح گونهٔ معماری

گونهٔ مورد نظر در استان کرمان، در مناطقی مانند ماهان و اختیار آباد رواج دارد. تصویر ۳، واحد مورد نظر برای طراحی را نشان می‌دهد. در منطقهٔ کرمان این سازه به‌صورت یک تا سه اتاق مورد استفاده قرار می‌گیرد. پایهٔ اصلی هندسی طراحیِ طاق‌آهنگ کمانی نیم‌دایره یا قطاعی از دایره است. درعمل، کمان نیم‌دایره نیز با افزایش ارتفاع دیوار پس از نقطهٔ شروع قوسِ تبدیل به قطاع خفته‌ای از دایره شده است. در حالت دوم، از قوس‌های قطاع دایره در بنا استفاده شده است که معمولاً نسبت خیز به دهانهٔ این قطاع‌ها یک به سه، با زاویهٔ قطاع تقریباً ۱۳۳ درجه است (براساس مشاهدهٔ میدانی و گفت‌وگو با آقای خیری استادکار سنتی و از شاگردان استاد لرزاده). طاق‌های استفاده‌شده، معمولاً تک‌آجره و به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر هستند. ضخامت دیوار برای یک دهانهٔ مسکونی متداول چهارمتری، چهار آجر، هشتاد سانتی‌متر است (به قول استاد خیری، برای هر متر دهانه، یک آجر به ضخامت دیوار اضافه می‌شود). پای کار قوس دو متر از تراز زمین بالاتر است.

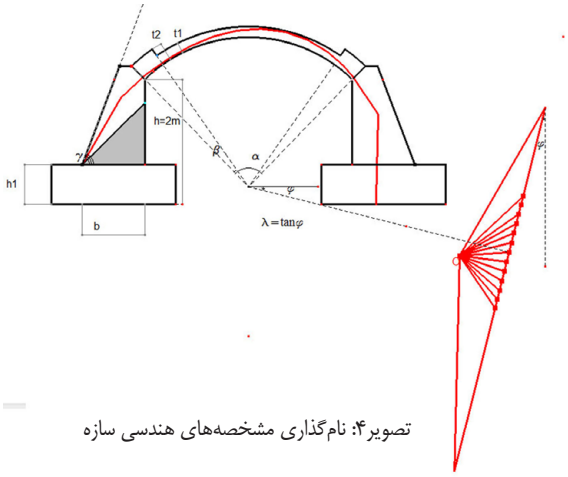


تصویر ۳: پلان، برش و نمای سه‌بعدی یک واحد طراحی (اندازه‌ها به متر است.)

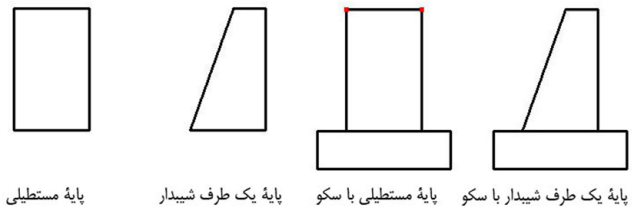
٤. راهنما و نام‌گذاری عناصر و مشخصه‌های هندسی

راهنمای مشخصات هندسی سازه در جدول ۱ و تصویرهای ۴ و ۵ معرفی شده است. در متن، پیرنشین یا سکوی داخلی و خارجی را به‌اختصار سکو می‌نامیم. h و h1 به‌ترتیب ارتفاع شروع قوس از تراز زمین و ارتفاع سکو هستند و در تمامی حالت‌ها به‌ترتیب ۲ و ۰/۴ متر فرض شده‌اند. در تمامی تحلیل‌ها، عرض دهانه چهار متر فرض شده است. در متن، سمت اعمال نیروی زلزله را این‌گونه معرفی می‌کنیم: چنانچه برای مثال، نیروی جانبی از سمت راست مقطع وارد شود، جهت سمت راست را «رو به زلزله» و سمت چپ را «پشت به زلزله» می‌خوانیم. قسمت خاکستری رنگ در تصویر ۴ بخشی از پایه است که به‌دلیل شکست مایل از دیوار جدا شده و حذف شدن آن بر پاسخ، اثر کاهنده دارد: نمودار نیروها، در حالت دوران‌یافته با زاویهٔ ϕ و با قطب (o)، در سمت راست تصویر و نمودار فرم، مسیر رانش، در مقطع سازه ترسیم شده‌اند.

مطالعات معماری ایران
دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۹ ـ بهار و تابستان ۱۴۰۵



تصویر۴: نام‌گذاری مشخصه‌های هندسی سازه



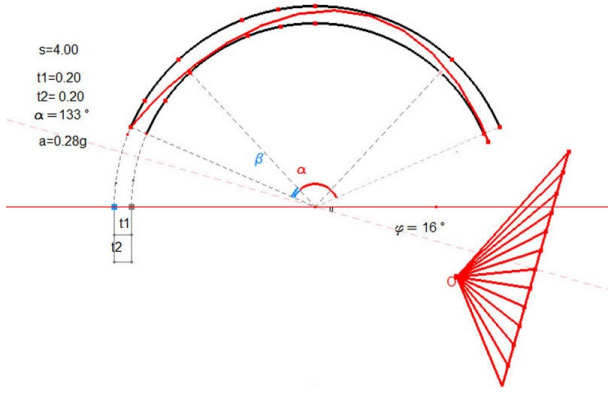
تصویر ۵: نام‌گذاری شکل‌های مختلف مقطع پایه

جدول ۱: نام‌گذاری مشخصه‌های هندسی سازه

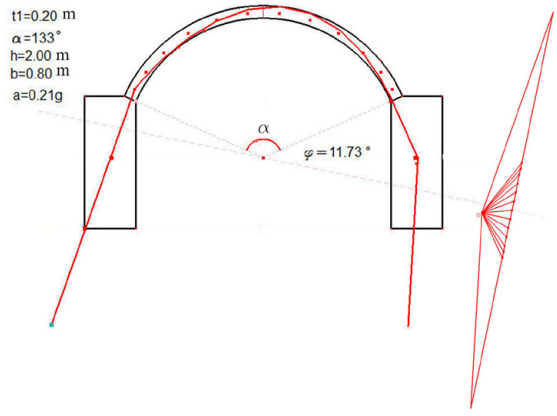
ضخامت قوس	t1	زاویهٔ قطاع قوس	α	ارتفاع نقطهٔ شروع قوس از تراز زمین (۲متر)	h	عرض پایه در محل اتصال به زمین یا سکو	b	نسبت شتاب جانبی به شتاب ثقل	λ=tan φ	زاویهٔ بر بیرونی دیوار	γ
ضخامت چیدن پای قوس	t2	زاویهٔ چیدن پای قوس	β	ارتفاع سکو یا پیرنشین(۰/۴۰ متر)	h1	زاویهٔ دوران زمین یا زاویهٔ دوران چندضلعی نیرو	φ	شتاب جانبی براساس شتاب ثقل	a=λ.g		

۵. تحلیل حد نهایی پایداری جانبی سازه در وضع موجود

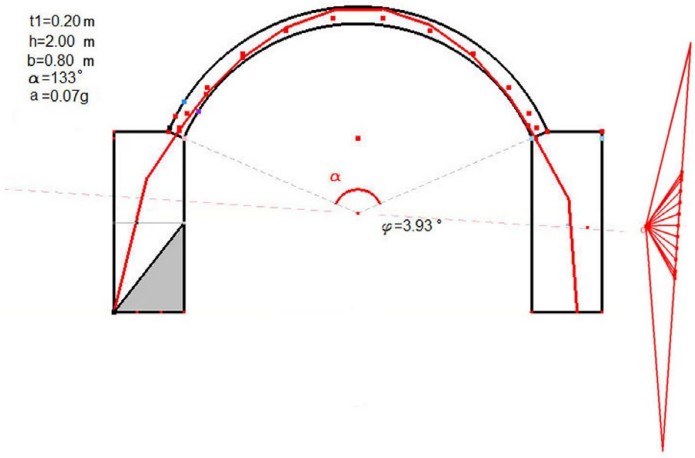
در نخستین گام، حد پایداری جانبی شرایط موجود بررسی می‌شود. درحالی‌که این حد برای قوس منفرد با مشخصه‌های ذکرشده در بالا، ۰/۲۸ شتاب ثقل است (تصویر ۶)، حد مجموعهٔ قوس و پایه به ۰/۲۱ شتاب ثقل تقلیل می‌یابد (تصویر ۷). با رخداد ترک در پایه، که غالباً به‌دلیل ضعف بندهای قائم رخ می‌دهد، این حد به ۰/۰۷ شتاب ثقل کاهش می‌یابد (تصویر ۸). پس، سازه نه‌تنها در برای منطقهٔ با لرزه‌خیزی بالا با شتاب مبنای طرح ۰/۳۵ شتاب ثقل، بلکه در سایر پهنه‌های با خطر کمتر نیز کارکرد ضعیفی خواهد داشت. در وضع موجود، فروریختگی با تشکیل سه مفصل مومسان در قوس و مفصل دیگر در پای دیوار ایجاد می‌شود. پس از باز شدن پای قوس، قوس فروریخته و با حذف رانش آن، با توجه به اینکه سمت قرارگیری بردار وزن نسبت به مفصل پای دیوار عوض نمی‌شود، دیوار به سر جای خود برمی‌گردد. نکتهٔ اخیر، یعنی عدم ریزش دیوار، نکتهٔ مثبتی در طراحی محسوب می‌شود.



تصویر ۶: حد نهایی پایداری جانبی قوس مرسوم ۰/۲۸ شتاب ثقل است.



تصویر ۷: بررسی شرایط موجود برای نسبت خیز به دهانهٔ ۱/۳: حد نهایی پایداری جانبی بدون لحاظ ترک پایه، ۰/۲۱ شتاب ثقل است.

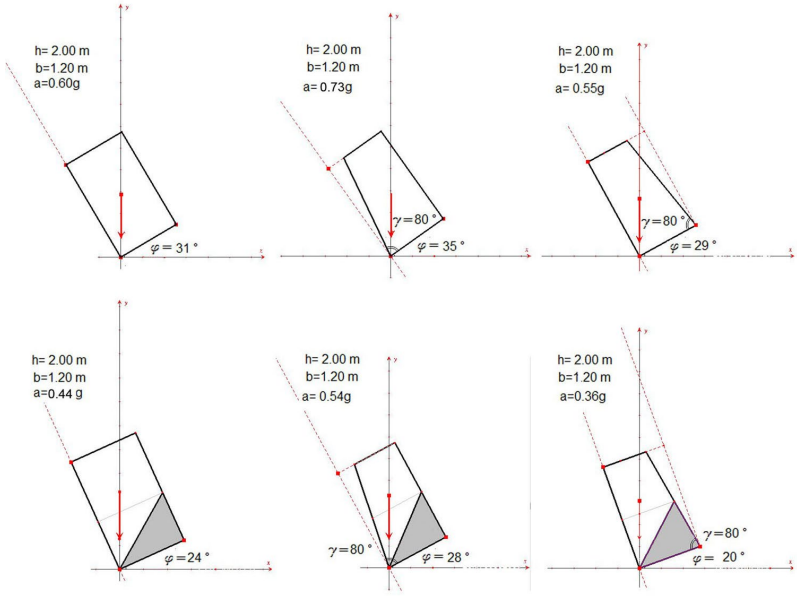


تصویر ۸: با رخداد ترک پایه حد نهایی به ۰/۰۷ شتاب ثقل می‌رسد.

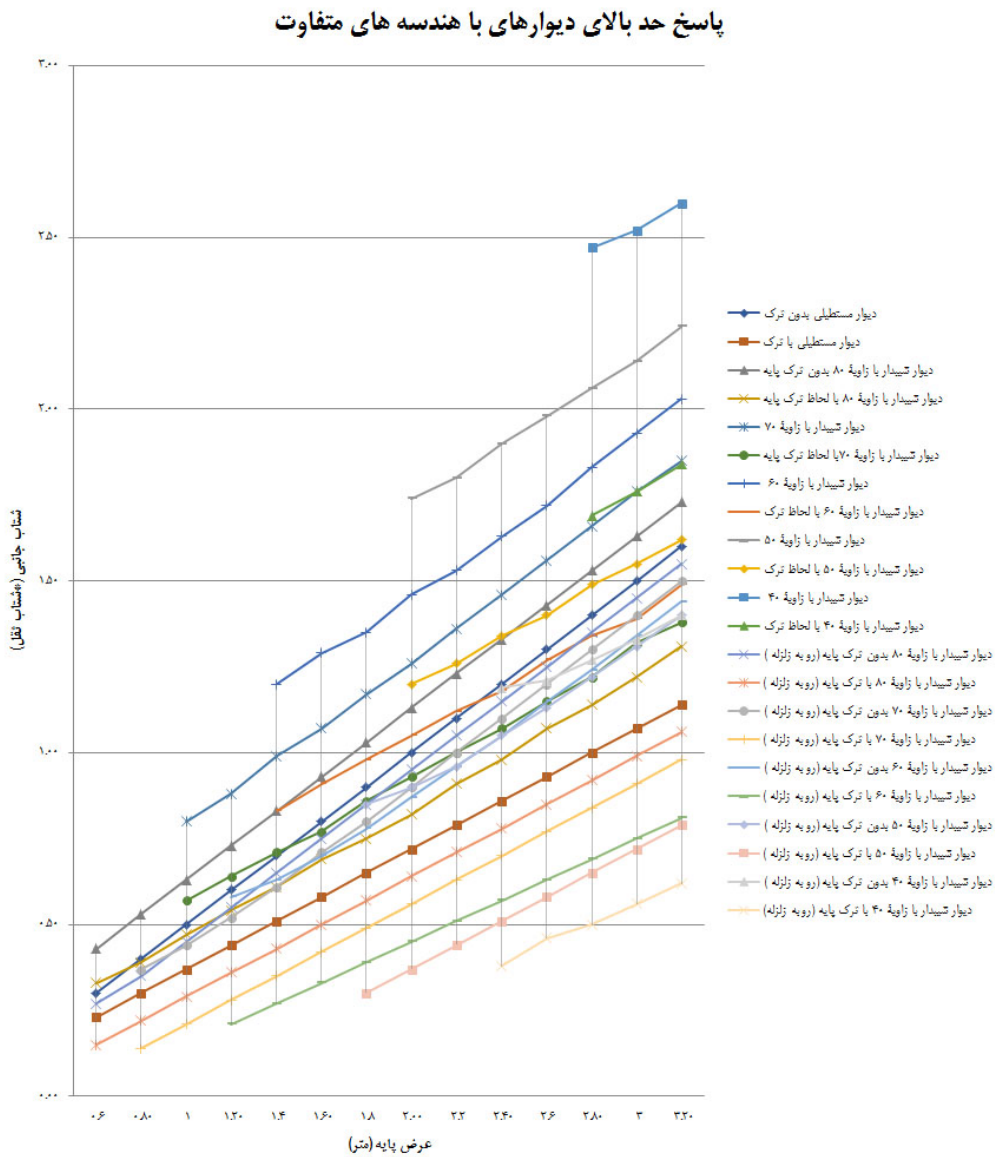
با توجه به نیاز به افزایش پایداری سازه‌ای، اکنون به بررسی عناصر سازه‌ای اثرگذار بر طرح به‌صورت منفرد پرداخته می‌شود.

٦. مسائل طراحی پایه

در نخستین گام، پایه با مقطع مستطیلی و پایه با بر شیب‌دار (مقطع ذوزنقهٔ قائم‌الزاویه) بررسی می‌شود. با خروج بردار وزن از قاعدهٔ پایه، پایه واژگون می‌شود. در پایه‌هایی که دارای بندهای عمودی بین بلوک‌ها هستند، با خروج خط رانش از یک‌سوم وسط، پایه ترک می‌خورد. مثال‌هایی از نتایج در تصویر ۹ و نتایج کامل در نمودار تصویر ۱۰ نشان داده شده‌اند. برای دیوارهای شیب‌دار، اثر میزان زاویهٔ تمایل دیوار در وجه بیرونی در نظر گرفته شده است.



تصویر ۹: ردیف بالا: حد پایداری برای چپ: پایهٔ مستطیلی. وسط: پایهٔ شیب‌دار در جهت مقابل زلزله. راست: پایهٔ شیب‌دار در جهت موافق زلزله. ردیف پایین: به همان ترتیب، پاسخ‌ها را با در نظر گرفتن ترک پایه نشان می‌دهد.

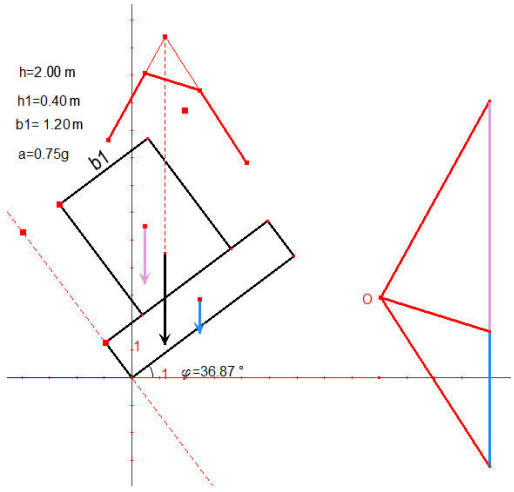


تصویر ۱۰: نمودار پاسخ حد بالای دیوارها با هندسه‌های متفاوت در مقابل شتاب ثابت جانبی، برحسب نسبتی از شتاب ثقل

درصورتی‌که پایه‌ای با مقطع مستطیلی‌شکل ترک نخورد، حد پایداری آن با «نسبت عرض به ارتفاع پایه» تعیین می‌شود (تصویرهای ۹ و ۱۰). برای مثال، پایه‌ای به عرض ۱/۲۰ و ارتفاع دو متر تا شتاب جانبی معادل ۰/۶۰ برابر شتاب ثقل پایدار خواهد ماند. مایل کردن برِ بیرونی دیوار تا حدی قابل انجام است، که امکان اجرای قوس در بالای دیوار باشد. ازاین‌رو، زاویه‌های میل تند در دیوارهای لاغر اعمال نمی‌شوند. با «شیب‌دار ساختن پایه از جهت مخالف زلزله»، می‌توان علاوه‌بر کاهش وزن، پایداری سازه را در این جهت بهبود بخشید: در تصویر ۹، با ایجاد شیب در دیوار، با حفظ عرض ۱/۲۰ متر در محل اتصال به زمین و با زاویهٔ شیب ۸۰ درجه برای برِ بیرونی دیوار، حد پایداری جانبی آن از ۰/۶۰ برابر به ۰/۷۳ برابر شتاب ثقل افزایش یافته است. البته باید توجه داشت که اثر این شیب یک‌طرفه، برای

جهت معکوس اعمال شتاب، منفی است و در این مثال، منجر به کاهش حد پایداری لرزه‌ای از ۰/۶۰ به مقدار ۰/۵۵ شتاب ثقل می‌شود. این نکته از مواردی است که در وهلهٔ اول، ممکن است دربارهٔ کارکرد دیوار با برِ شیب‌دار در افزایش پایداری لرزه‌ای کلیت سازه در هر دو جهت زلزله ابهام ایجاد کند.

افزودن پیرنشین یا سکوی داخلی نیز کارکرد ویژه‌ای در افزایش پایداری دیوار دارد. در پژوهش جاری، ارتفاع سکو و پیرنشین ۰/۴۰ متر فرض شده که بسته به نظر طراح معمار می‌تواند برای نشستن از بیرون یا داخل یا هر دو مناسب باشد. برای مثال، با استفاده از پیرنشین، حد پایداری جانبی برای پایه‌های مستطیل شکل در حالت بدون ترک، ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. امکان واژگونی سکو، در صورت در نظر گرفتن پهنای زیاد و ارتفاع کم برای آن وجود ندارد. ازاین‌رو، وجود آن مانند بالا آوردن زمین و کم کردن ارتفاع دیوار، در تحلیل این پژوهش، تا ۱/۶۰ متر است.



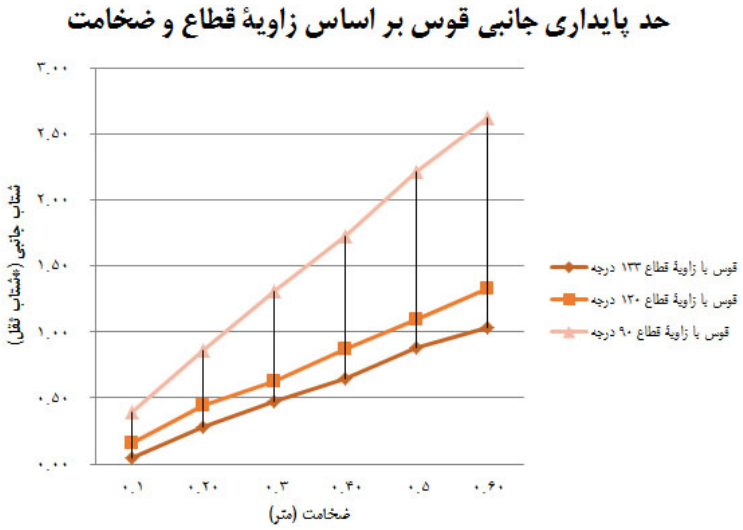
تصویر ۱۱: ایجاد پیکره‌بندی مناسب با پله‌ای ساختن مقطع دیوار با استفاده از سکو. بردار صورتی، فیروزه‌ای، آبی و مشکی‌رنگ به‌ترتیب از مرکز ثقل قسمت بالایی، پایین و کلیت مقطع می‌گذرند. در این تصویر بردار صورتی‌رنگ معیار تعیین حد شده است.

با خارج شدن مسیر نیروی برایند وزن و نیروی زلزله از یک‌سوم وسط پایه از یک سمت، در هر ترازی از ارتفاع پایه، در سوی دیگر نیروی کششی ایجاد شده و پایه ترک می‌خورد. برای مثال، در تصویرهای ۹ و ۱۰، رخداد ترک حد پایداری پایه مستطیلی با عرض ۱/۲۰ متر را به ۰/۴۴ شتاب ثقل کاهش می‌دهد (حدود ۲۵ درصد کاهش). برای به تعویق انداختن اثر شکست در پایه و رسیدن به حد پایداری بالاتر، می‌توان عرض پایه را بسته به تناسبات افزایش داد.

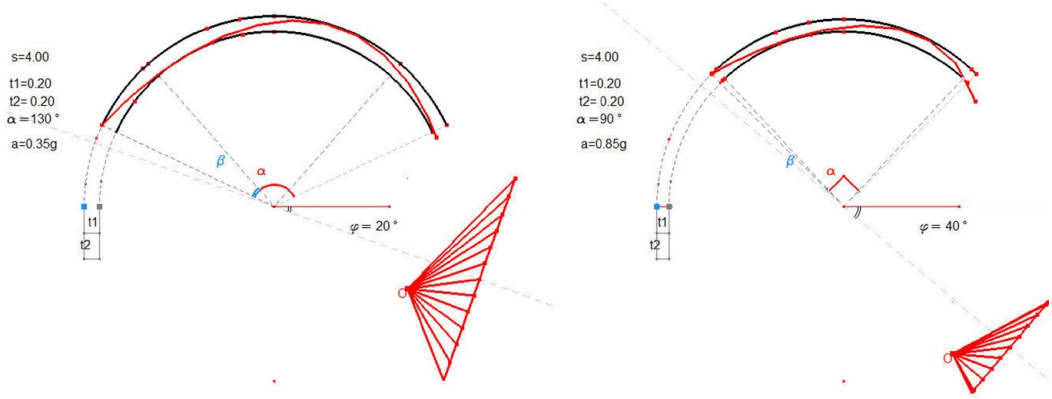
در جمع‌بندی این قسمت، می‌توان گفت تکنیک‌های سنتی مانند شیب‌دار کردن برِ دیوار و استفاده از سکو اثرهای معناداری بر پاسخ پایه دارند و با بررسی ترکیب اثر آن‌ها با رفتار قوس می‌توان از آن‌ها استفاده نمود.

۷. طراحی قوس قطاع دایره

در این قسمت، اثر تکنیک سنتی ضخیم کردن پای قوس و کار با زاویهٔ قطاع آن بررسی می‌شود. با کاهش خیز قوس نیم‌دایره یا تبدیل آن به قطاع دایره و افزایش نسبت ضخامت به دهانهٔ قوس، حد پایداری لرزه‌ای آن افزایش می‌یابد (ایزدپناه و علمداری ۱۴۰۳). این نکته یک راهکار مرسوم تاریخ معماری و همچنین، در منطقهٔ مورد مطالعه را یادآوری می‌کند؛ یعنی استفادهٔ مستقیم از قوس‌های قطاع دایره یا چیدن شانهٔ قوس نیم‌دایره به‌گونه‌ای که آن را به قطاع تبدیل کند. چنانچه بخواهیم ضخامت یک آجر ۲۰ سانتی‌متر را برای قوس، با توجه به رواج این نحو اجرا حفظ کنیم، زاویهٔ قطاع قوس مورد نظر برای دستیابی به پایداری لرزه‌ای بین ۰/۳۵ تا ۰/۸۵ برابر شتاب ثقل، به‌ترتیب ۱۳۰ و ۹۰ درجه خواهد بود (تصویر ۱۲ و ۱۳).

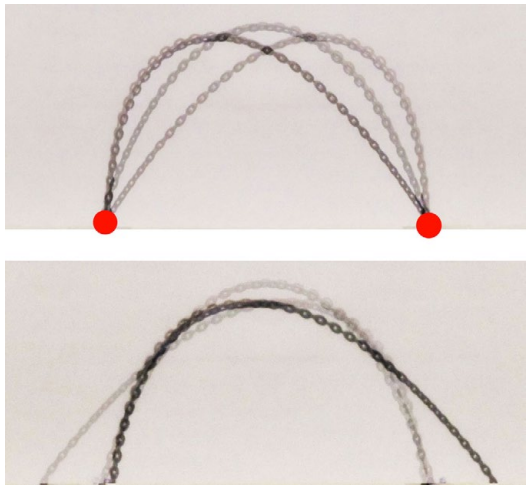


تصویر ۱۲: حد پایداری نهایی قوس قطاع براساس ضخامت و زاویهٔ قطاع (برای دهانهٔ چهار متر)



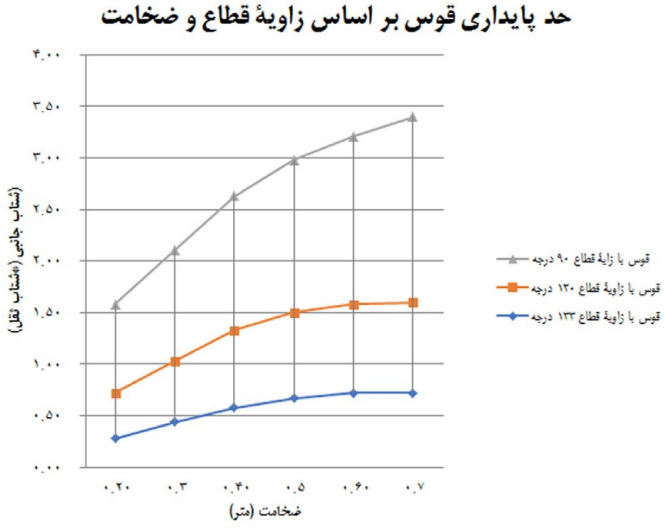
تصویر ۱۳: برای قوسی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر، با زاویهٔ قطاع ۱۳۰ تا ۹۰ درجه حد نهایی پایداری لرزه‌ای از ۰/۳۵ تا ۰/۸۵ شتاب ثقل متغیر است.

در گام بعدی، به اثر افزایش ضخامت پای قوس پرداخته می‌شود. تصویر ۱۴ انطباق دو شکل معکوس زنجیر آویخته را معادل بار گستردهٔ همگن در طول منحنی (گراف تابع هایپربولیک)، تحت اثر بار قائم و بار جانبی، با روش دوران صفحهٔ زمین نشان می‌دهد. طراح می‌تواند با قرار دادن دو مفصل در هنگام طراحی در پای قوس (تصویر ۱۴: بالا) و یا با در نظر گرفتن امکان ضخیم‌شدهٔ پایه (تصویر ۱۴: پایین) مسیر نیرو را در حالت بارگذاری قائم و بارگذاری دوجهتهٔ جانبی بیابد. در طاق‌های دوبعدی، در معماری تاریخی، راهکار دوم برای بارگذاری نامتقارن مرسوم بوده و در طرح‌های بعد از مدرن، از گزینهٔ اول نیز استفاده شده است. در بیان دیگر، با توجه به اینکه در متداول‌ترین حالت فروریختگی قوس، یعنی با چهار مفصل، مطابق تصویر ۱۳ (پای سمت چپ قوس)، یک مفصل مومسان همواره در پای مقابل جهت نیروی زلزله در قوس ایجاد می‌شود (Clemente 1998)، افزایش عرض پای قوس، تشکیل این مفصل را به تأخیر انداخته و باعث بهبود رفتار لرزه‌ای آن می‌شود. (باید یادآوری نمود که این افزایش برای کاهش تنش‌ها در پای قوس نیست، بلکه برای یافتن یک مسیر تعادل در بارگذاری جانبی است، یعنی چنانچه قوس از بلوک‌های بر روی هم چیده شده از مصالحی با مقاومت بسیار بالا و در یک دهانهٔ کوچک نیز ساخته شود، برای حفظ تعادل خود باید این ضخامت را داشته باشد.)

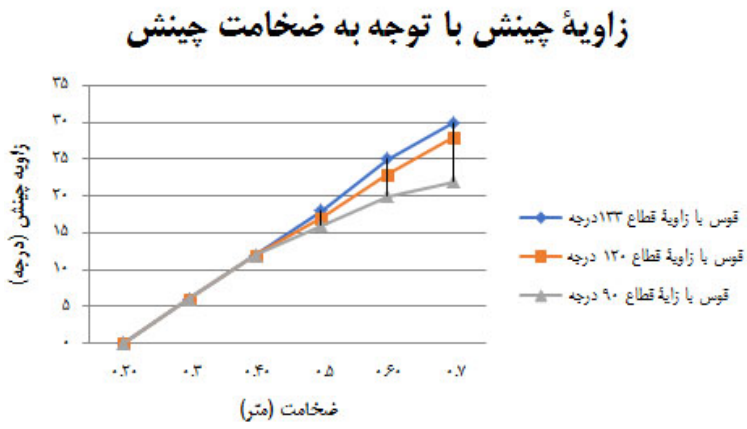


تصویر ۱۴: تقریب شکل کلی قوس تحت اثر بار وزن و بار جانبی با استفاده از تطابق سه زنجیر آویخته برای بار قائم و بار جانبی از دو طرف. بالا: دو مفصل در پای قوس طرح شده است. پایین: دو پایه ضخیم فرض شده‌اند.

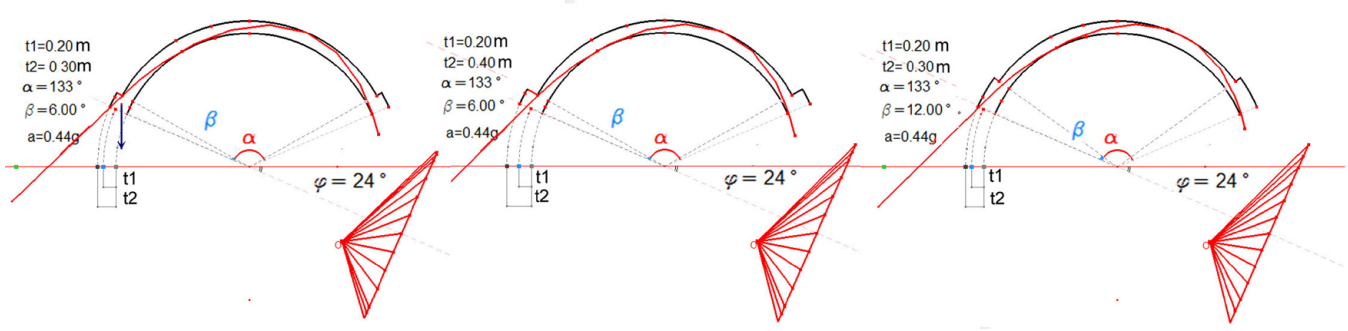
در اینجا سؤالی ایجاد می‌شود که چیدن پای قوس به چه میزان، یعنی تا چه ترازی و به چه عرضی حد پایداری لرزه‌ای مشخصی را تأمین می‌کند؟ برای کارایی روش، افزایش ضخامت پای قوس و میزان بالا آمدن این بخش باید از مسیر فونیکولار پیروی کند. برای این منظور، در ادامه تحلیلی انجام می‌شود و طی آن، عرض قوس را در قسمت پای آن تا زاویهٔ مشخصی از قوس افزایش می‌دهیم (نمودار تصویر ۱۵ و ۱۶). براساس تصویر ۱۵ تا ۱۷ مشخص می‌شود که این افزایش ضخامت تا ۳۰ سانتی‌متر برای قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳ درجه، حد پایداری را از ۰/۲۸ به ۰/۴۴ شتاب ثقل افزایش می‌دهد، درحالی‌که چینش باید تا زاویهٔ ۶ درجه انجام شود (تصویر ۱۶): اما، بعد از آن افزایش زاویهٔ چینش با حفظ ضخامت قبلی یا افزایش ضخامت با همان زاویهٔ چینش پای قوس، نیز حد پایداری تغییر نمی‌یابد (تصویر ۱۷).



تصویر ۱۵: میزان افزایش حد پایداری با افزایش ضخامت پای قوس



تصویر ۱۶: میزان زاویهٔ چینش لازم پای قوس با توجه به ضخامت پای قوس قطاع دایره با ضخامت پایهٔ ۰/۲۰ متر

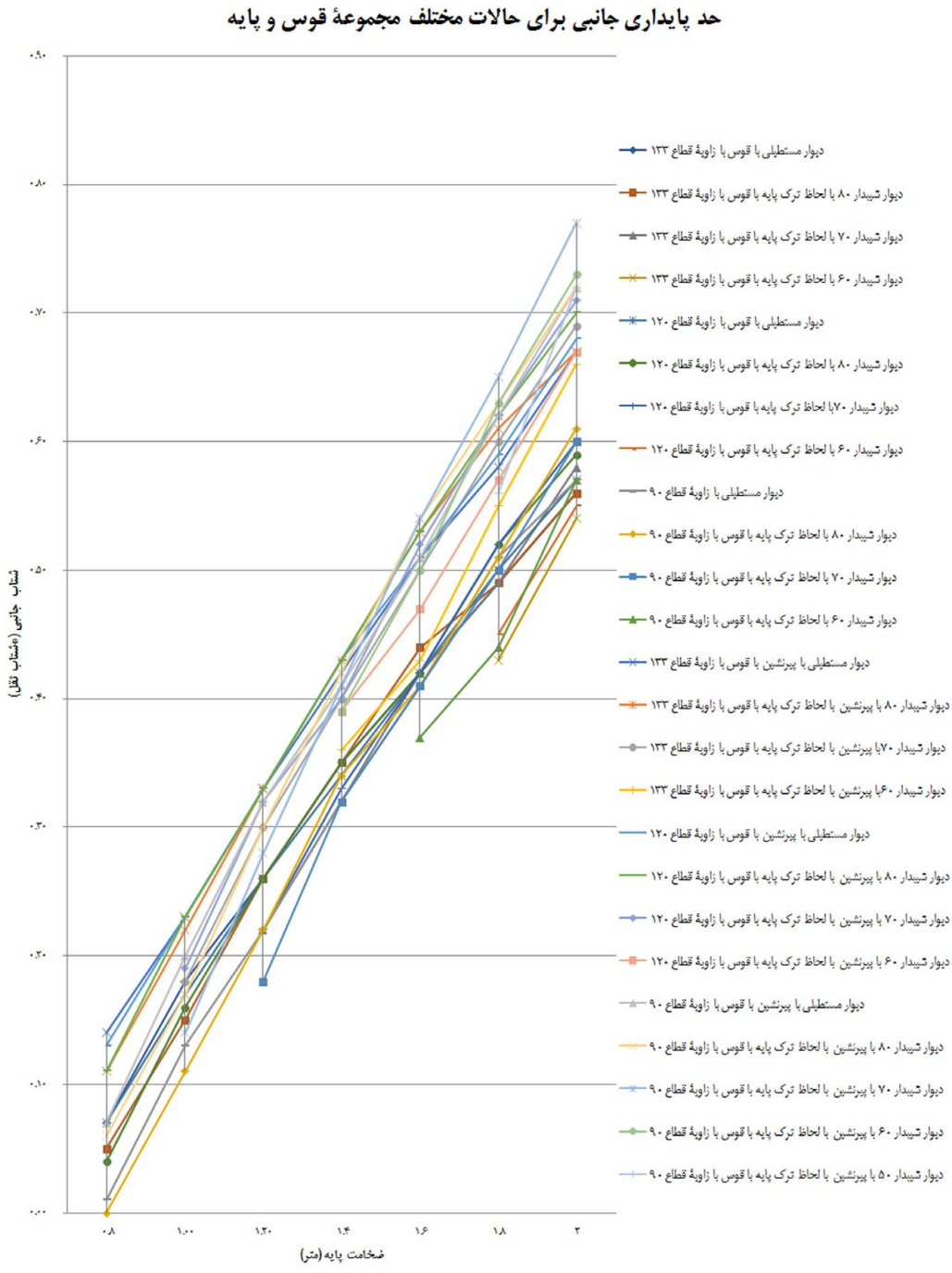


تصویر ۱۷: چپ: در قوسی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر، با زاویهٔ قطاع ۱۳۳ درجه، با چیدن پای قوس به ضخامت ۰/۳۰ متر تا زاویهٔ ۶ درجه، حد نهایی پایداری لرزه‌ای به ۰/۴۴ شتاب ثقل افزایش می‌یابد. وسط: افزایش ضخامت پای قوس بدون افزایش زاویهٔ چینش؛ و راست: افزایش چینش تا زاویه‌های بیشتر، بدون افزایش ضخامت پای قوس، تأثیری بر پایداری قوس ندارند و باعث افزایش وزن سازه نیز می‌شوند.

در جمع‌بندی این بخش، می‌توان گفت که ازطریق دو تکنیک استادکاران تاریخ معماری، کاهش خیز و چیدن شانهٔ قوس پایداری لرزه‌ای قوس افزایش می‌یابد. اینکه کدام انتخاب مناسب‌تر خواهد بود، به رفتار مجموعهٔ قوس و پایه وابسته است که در ادامه بررسی خواهد شد. به‌هرحال، قوس انتخابی باید بتواند به‌صورت مجزا از پایه، حد پایداری لرزه‌ای مورد نظر را تحمل نماید.

۸. طراحی مجموعهٔ قوس و پایه

بعد از بررسی کلی عناصر سازه‌ای به‌صورت جداگانه، نخست به تحلیل مجموعهٔ قوس و پایه پرداخته می‌شود برای تطبیق با شرایط واقعی، ترک پایه را نیز در هر مورد لحاظ می‌گردد. تلاش می‌شود با تغییر ضخامت پایه، مایل کردن بر بیرونی پایه، استفاده از سکو، قطور کردن پای قوس و تغییر زاویهٔ قطاع قوس با حفظ ضخامت اولیهٔ آن، حد پایداری افزایش یابد. پاسخ‌ها (۱۳۸ حالت) در نمودار تصویر ۱۸ و تصحیح‌های لازم در ضخامت پای قوس در جدول‌های ۲ و ۳ قابل مشاهده‌اند.



تصویر ۱۸: نمودار پاسخ مجموعهٔ قوس و پایه برای حالت‌های مختلف

جدول ۲: ضخامت لازم برای چیدن پای قوس در نمونه‌های تحلیل

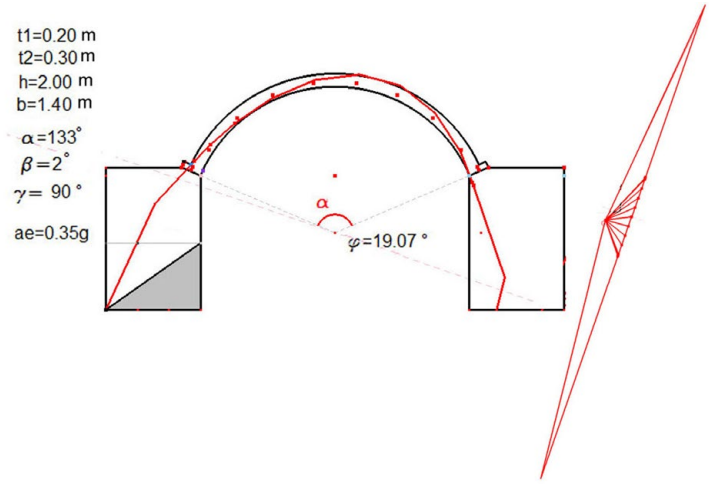
مشخصات سازه		ضخامت پایه (متر)						
		۲/۰۰	۱/۸۰	۱/۶۰	۱/۴۰	۱/۲۰	۱/۰۰	۰/۸۰
دیوار مستطیلی با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳	ضخامت پای قوس (متر)	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) مستطیلی با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) مستطیلی با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰	۰	–	–
دیوار شیب‌دار (۶۰) مستطیلی با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۰/۴۰	۰/۳۰	–	–	–	–	–
دیوار مستطیلی با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۰/۴۰	۰/۳۰	–	–	–	–	–
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۰/۴۰	۰/۳۰	۰	۰	۰	–	–
دیوار شیب‌دار (۶۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۰/۳۰	۰/۳۰	–	–	–	–	–
دیوار مستطیلی با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	–	–
دیوار شیب‌دار (۶۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	–	–	–	–
دیوار مستطیلی با پیرنشین با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۶۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰	۰	۰
دیوار مستطیلی با پیرنشین با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰	۰	۰	–
دیوار شیب‌دار (۶۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰	–	–	–
دیوار مستطیلی با پیرنشین با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	
دیوار شیب‌دار (۶۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	–	–	–
دیوار شیب‌دار (۵۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع		۰	۰	–	–	–	–	–

جدول ۳: زاویهٔ لازم برای چیدن پای قوس در نمونه‌های تحلیل

مشخصات سازه		ضخامت پایه (متر)						
		۲/۰۰	۱/۸۰	۱/۶۰	۱/۴۰	۱/۲۰	۱/۰۰	۰/۸۰
دیوار مستطیلی با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳	زاویهٔ چیدن پای قوس	۱۰	۸	۴	۲	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) مستطیلی با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۱۰	۸	۴	۲	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) مستطیلی با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۱۰	۸	۴	۰	۰	–	–
دیوار شیب‌دار (۶۰) مستطیلی با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۸	۴	–	–	–	–	–
دیوار مستطیلی با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۶	۲	۲	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۶	۴	–	–	–	–	–
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۶	۲	۰	۰	۰	–	–
دیوار شیب‌دار (۶۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۴	۴	–	–	–	–	–
دیوار مستطیلی با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	–	–
دیوار شیب‌دار (۶۰ درجه) با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	–	–	–	–
دیوار مستطیلی با پیرنشین با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۱۶	۱۲	۸	۴	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۱۶	۱۲	۸	۴	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۱۶	۱۲	۸	۴	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۶۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳		۱۶	۱۲	۸	۴	۰	۰	۰
دیوار مستطیلی با پیرنشین با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۸	۶	۲	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۸	۶	۴	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۱۲	۶	۴	۰	۰	۰	–
دیوار شیب‌دار (۶۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۱۲۰		۱۲	۶	۲	۰	–	–	–
دیوار مستطیلی با پیرنشین با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۸۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
دیوار شیب‌دار (۷۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	۰	۰	–
دیوار شیب‌دار (۶۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع ۹۰		۰	۰	۰	۰	–	–	–
دیوار شیب‌دار (۵۰ درجه) با پیرنشین با لحاظ ترک پایه با قوس با زاویهٔ قطاع		۰	۰	–	–	–	–	–

۱.۸. طراحی مجموعهٔ قوس و پایه با پایهٔ مستطیلی

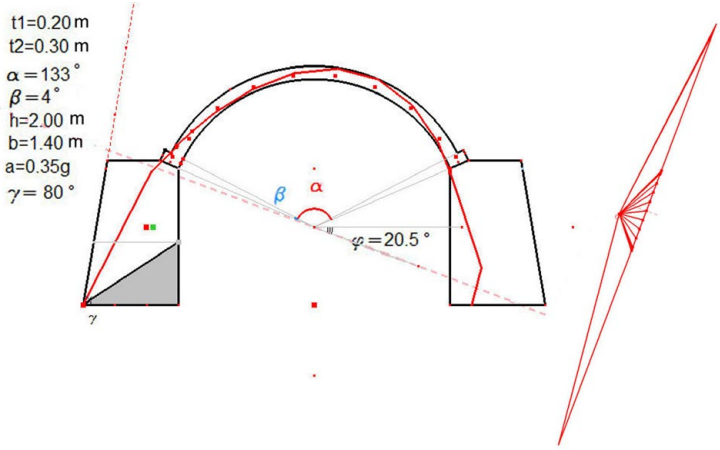
نخست، طراحی با پایهٔ مستطیلی بررسی می‌شود. برای نمونه، در جدول ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که در طراحی برای شتاب جانبی ۰/۲۰ شتاب ثقل، نیازی به چیدن پای قوس با زاویهٔ قطاع ۱۳۳ درجه نیست؛ اما برای سطوح بالاتر از حد پایداری قوس مذکور، باید پای قوس نیز چیده شود. برای مثال، برای رسیدن به شتابی معادل ۰/۳۵ شتاب ثقل، نمودار تصویر ۱۸ و جدول‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهند که ضخامت دیوار باید ۱/۴۰ متر باشد و پای قوس باید با زاویهٔ قطاع ۱۳۳ درجه، اندکی با زاویهٔ ۲ درجه و به ضخامت ۰/۳۰ متر چیده شود (تصویر ۱۹). نمودار تصویر ۱۸، همین‌طور، مسئله را برای قوس‌های با زاویهٔ قطاع ۹۰ و ۱۲۰ درجه نشان می‌دهد.



تصویر ۱۹: طراحی برای افزایش حد پایداری جانبی به ۰/۳۵ شتاب ثقل برای پایهٔ مستطیلی

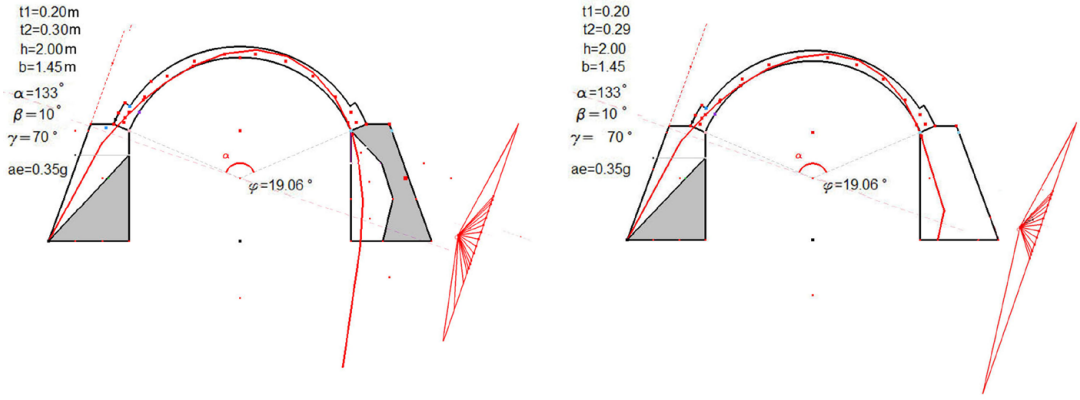
۲.۸. طراحی مجموعهٔ قوس و پایه با پایهٔ شیب‌دار یک‌طرفه

در مرحلهٔ دوم طراحی، مایل کردن برِ بیرونی پایه در طرح لحاظ می‌شود. یک نمونه از طراحی برای شتاب جانبی ۰/۳۵ شتاب ثقل در تصویر ۲۰ دیده می‌شود. برای همراهی با شکل فونیکولار، در جاهای لازم، تصحیحی در ضخامت پای قوس انجام شده است. برای مثال تصویر ۲۰، این مقدارها افزایش ضخامت پای قوس به ۰/۳۰ متر و با زاویهٔ چینش ۴ درجه برای پای قوس هستند.



تصویر ۲۰: طراحی برای افزایش حد پایداری جانبی به ۰/۳۵ شتاب ثقل برای پایهٔ شیب‌دار با زاویهٔ شیب ۸۰ درجه. افزایش ضخامت به میزان ۰/۳ متر و تا زاویهٔ ۴ درجه در پای قوس لازم است.

مسئله‌ای در هنگام افزایش ضخامت پایهٔ یک بر شیب‌دار در سازه ایجاد می‌شود: با خروج مسیر نیرو از یک‌سوم وسط، در پایهٔ رو به زلزله ترک رخ می‌دهد (تصویر ۲۱). در تناسبات مرسوم این ترک، فقط در پایهٔ پشت به زلزله رخ می‌دهد: علت این است که در حالت مرسوم قبل از ایجاد ترک در پایهٔ رو به زلزله، سازه فرومی‌ریزد. ازاین‌رو، این اثر در پژوهش‌های قبلی مشاهده نشده است. این مسئله در نمونه‌های حاضر، با توجه به میزان خطای روش جاری، سبب کاهش ظرفیت سازه یا تغییر مکانیسم فروریختگی نشده است.



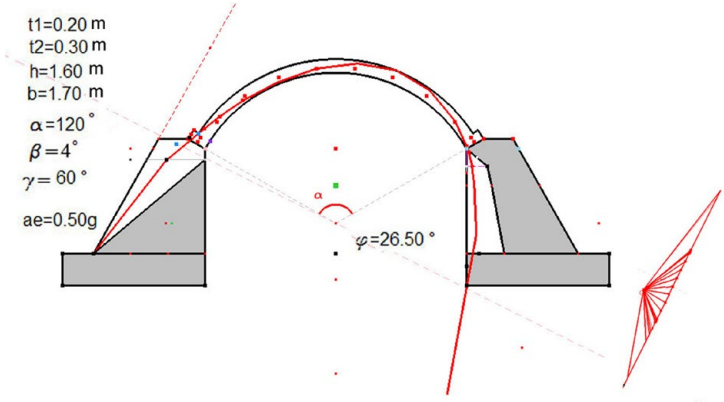
تصویر ۲۱: حد نهایی سازه، با در نظر گرفتن ترک در پایهٔ رو به زلزله (چپ)، در قیاس با حالت بدون ترک در پایهٔ راست (راست). ایجاد ترک در پایهٔ رو به زلزله بر میزان حد نهایی اثرگذار نیست و مکانیسم فروریختگی را عوض نمی‌کند.

در یک نگاه کلی، موارد زیر قابل بحث است:

نخست آنکه پاسخ‌ها با توجه به ضخامت پایه، تقریباً خطی تغییر می‌کنند. اضافه بر آن، شیب‌دار کردن دیوار، تا حد مشخصی، در ضخامت‌های پایین دیوار، از میزان پایداری مجموعه نسبت به پایهٔ مستطیلی می‌کاهد؛ سپس، با افزایش ضخامت پاسخ دو حالت یکسان شده، و با افزودن بیشتر ضخامت دیوار، حد پایداری چنین مجموعه‌ای افزایش خواهد یافت. درنتیجه، شیب‌دار کردن، با حفظ ضخامت دیوار در پایین، در حد شتاب جانبی ۰/۵۰ شتاب ثقل، بدون تغییر قابل اعتنا در حد پایداری، فقط سازه را ازنظر مصرف مصالح بهینه می‌کند. این راهکار برای شتاب جانبی بیش از ۰/۵۰ برابر شتاب ثقل، هم در افزایش پایداری و هم کاهش مصالح مفید است. برای دیوارهای با ضخامت پایین، کاهش زاویهٔ قطاع قوس بر سازه اثر منفی دارد، اما با افزایش ضخامت پایه تا حد مشخص، این ضعف جبران می‌شود. پس از آن، تقریباً برای شتاب‌های جانبی بالای ۰/۵۰ شتاب ثقل، قوس خفته کارکرد بهتری پیدا می‌کند.

۳.۸. افزودن سکو

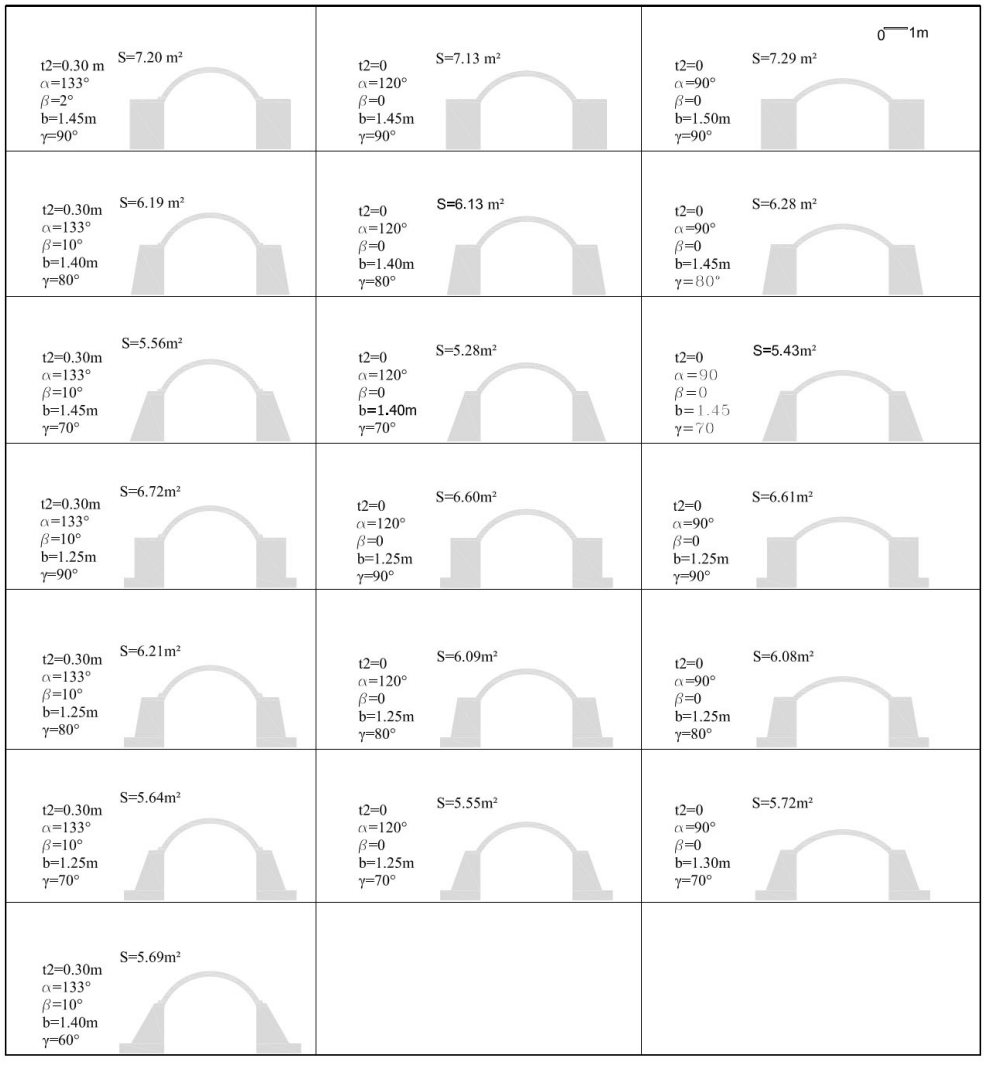
نتایج طراحی اثر محسوس حضور این عنصر را در افزایش پایداری نشان می‌دهند. تصویر ۲۲، نمونه‌ای از طراحی برای این حالت را نشان می‌دهد. دوباره در صورت نیاز برای یافتن مسیر فونیکولار به ضخامت پای قوس افزوده شده که تصحیح لازم در جدول ۲ و ۳ درج شده است.



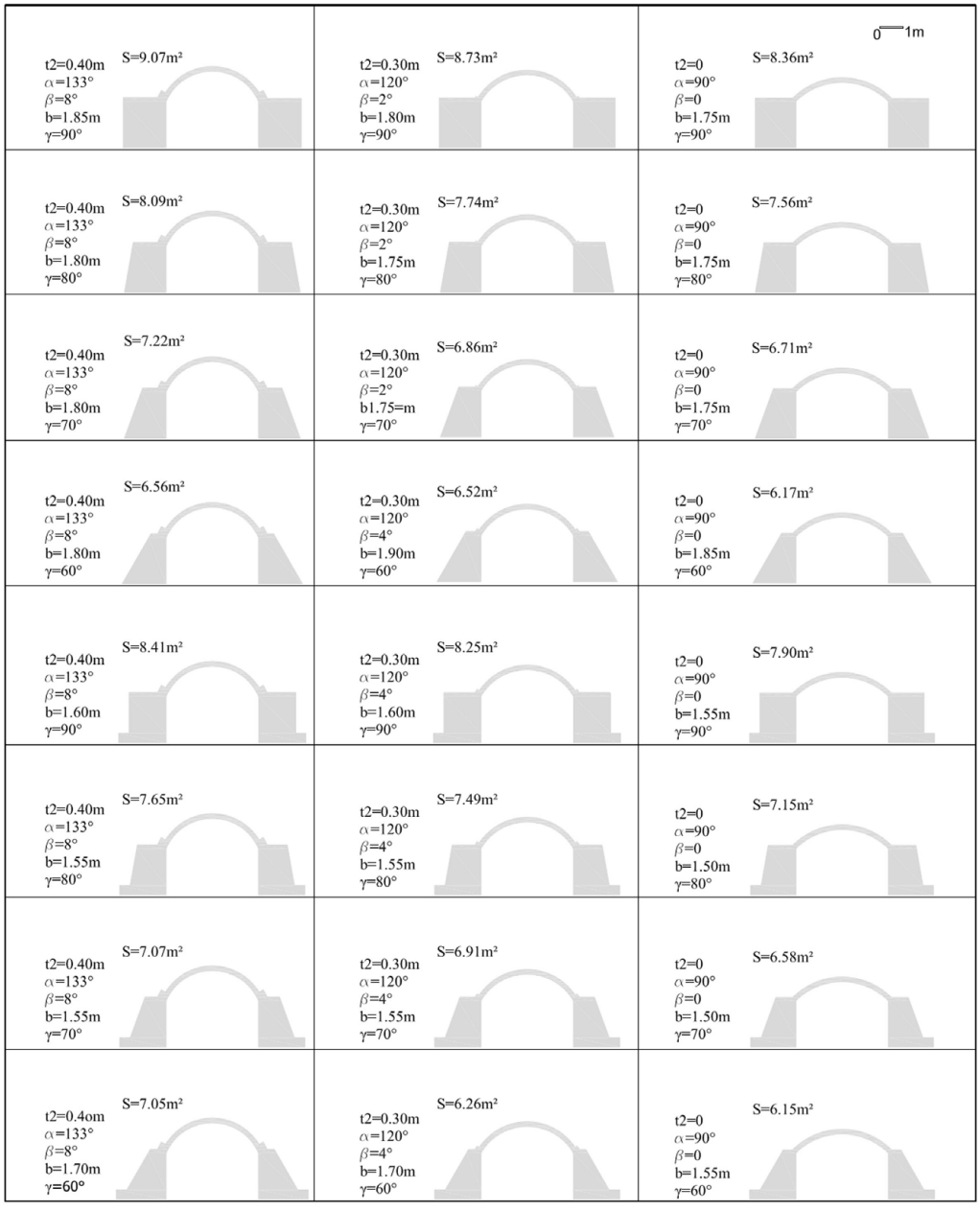
تصویر ۲۲: طراحی برای افزایش حد پایداری جانبی به ۰/۵۰ شتاب ثقل برای پایهٔ شیب‌دار با زاویهٔ شیب ۶۰ درجه و با استفاده از پیرنشین

۹. مقایسهٔ پاسخ‌ها برای انتخاب مقاطع بهینه

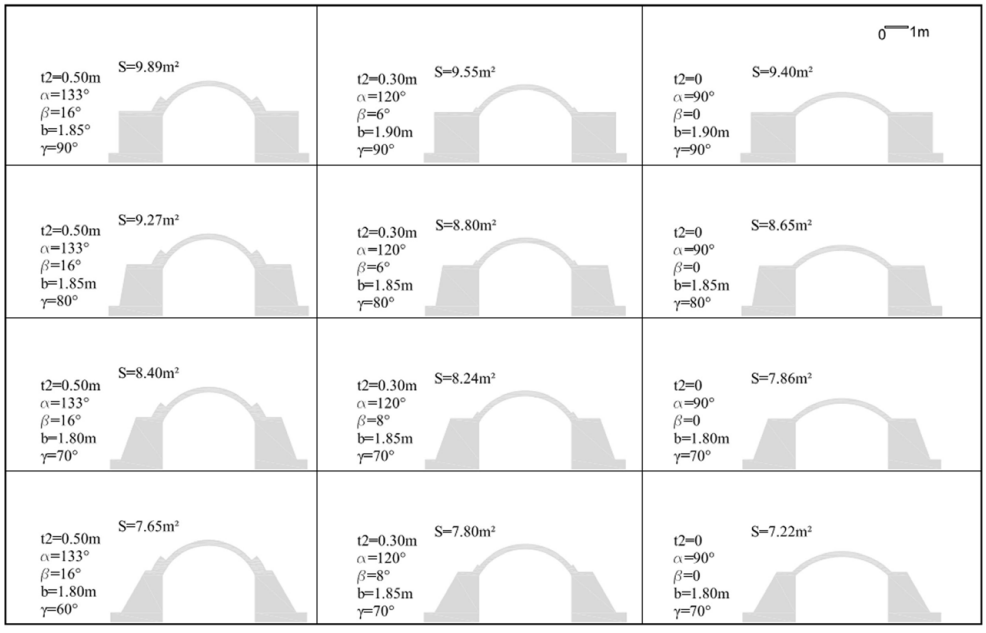
در این قسمت، برای انتخاب مقاطع بهینه ازنظر مصرف مصالح، مساحت گزینه‌های طراحی برای حدهای شتاب جانبی ۰/۳۵، ۰/۵۰ و ۰/۶۵ شتاب ثقل محاسبه و باهم مقایسه می‌شوند. طرح کلی، برای انتخاب شکل مورد نظر توسط طراحان، براساس ویژگی‌های بصری در تصویر ۲۳ تا ۲۵ ارائه شده و اندازه‌ها و مساحت مقطع برای هر طرح در کنار تصویر به‌صورت عددی درج شده‌اند. نکتهٔ مهم این است که می‌توان با مقدار مصالح مشخص، با تغییر پیکره‌بندی، حد پایداری را به طرز معناداری افزایش داد. برای مثال، در گزینه‌های تصویر، با حفظ مساحت سازه، در حدود ۷/۲ متر مربع، با تغییر پیکره‌بندی می‌توان حد نهایی پایداری جانبی را از ۰/۳۵ به ۰/۵۰ و ۰/۶۵ شتاب ثقل افزایش داد.



تصویر ۲۳: شکل کلی مقاطع، ابعاد و مساحت‌ها (S) برای طراحی در برابر شتاب جانبی ۰/۳۵ شتاب ثقل



تصویر ۲۴: شکل کلی مقاطع، ابعاد و مساحت‌ها برای طراحی در برابر شتاب جانبی ۰/۵۰ شتاب ثقل



تصویر ۲۵: شکل کلی مقاطع، ابعاد و مساحت‌ها برای طراحی در برابر شتاب جانبی ۰/۶۵ شتاب ثقل

نتیجه

در این پژوهش، تلاش شد با توجه به اهمیت پیکره‌بندی در رفتار لرزه‌ای، با طراحی و کار بر روی مشخصه‌های هندسی مقطع یک واحد از معماری خانه‌های روستایی متشکل از طاق‌آهنگ و پایه، حد پایداری جانبی آن بدون تسلیح از حد فعلی، کمتر از ۰/۱ شتاب ثقل، به فاصلهٔ ۰/۳۵ تا ۰/۶۵ شتاب ثقل ارتقا یابد. در این مسیر، از برخی تکنیک‌های مرسوم استادکاران استفاده شد. نخست، سه مسئلهٔ جدید در مورد عناصر سازه‌ای بررسی و ارائه شد: ضخیم کردن پای قوس تا زاویهٔ مناسب بر روی افزایش پایداری جانبی قوس و بهینه‌سازی آن تأثیر مهمی دارد؛ سکو نیز با کاهش ارتفاع دیوار بر افزایش پایداری هندسی اثر قابل اعتنایی می‌گذارد؛ و استفاده از دیوار با بر بیرونی شیب‌دار در بعضی از تناسبات صرفاً برای بهینه‌سازی و در برخی دیگر، برای بهینه‌سازی و افزایش حد پایداری لرزه‌ای مفید است. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که تکنیک‌های ذکرشده، به‌علاوهٔ تکنیک دیگر استفاده‌شده در طراحی این نوشتار که در پیشینه سابقه دارد، یعنی کار با زاویهٔ قطاع قوس، برای افزایش پایداری سازهٔ متشکل از مجموعهٔ قوس و پایه، به میزان بالا مؤثر هستند. میزان حد پایداری مورد نظر این نوشتار، با استفاده از تغییر در پیکره‌بندی موجود و بدون تسلیح، با استفاده از این تکنیک‌ها قابل حصول است. مساحت‌ها و شکل‌های کلی مقطع در طرح‌های پیشنهادی این نوشتار به‌عنوان معیاری برای انتخاب بهینه و البته با توجه به ویژگی بصری بنا استخراج و در متن گزارش شدند. نتایج و طرح‌ها برای پیکره‌بندی ارائه شدند که می‌توانند مورد استفادهٔ طراحان و سازندگان قرار گیرند.

مطالعات بعدی

طرح‌های پیشنهادی این نوشتار، علاوه‌بر استفاده به‌صورت سرتاسری به‌عنوان مقطع دیوار، می‌توانند توسط روش کیفی بلاک و اوشندورف (Allen et al. 2010) به‌صورت پشت‌بندهای منقطع نیز استفاده شوند. در صورت اخیر، با استفاده از روش تحلیلی دیگری باید انتقال ایمن نیروی جانبی ناشی از زلزله از دیوار میان پشت‌بندها به پشت‌بندها بررسی شود. برای تحلیل گرافیکی این مطلب، نیاز به مدل‌سازی رایانه‌ای سه‌بعدی فونیکولار در ناحیهٔ دیوار و پشت‌بند است که هنوز به‌دلیل نامعینی زیاد و بالتبع، نیاز به سعی و خطای بسیار توسعه‌نیافته است. در صورت استفاده از پشت‌بندهای مستطیلی،

استفاده از فضای میان آن‌ها برای کارکردهای مختلف می‌تواند راه‌حل فضایی مناسبی در طراحی باشد. روش کمی مایکلز (Michiels 2018) نیز می‌تواند برای سه‌بعدی‌سازی استفاده شود؛ گرچه با فرم‌های متداول معماری روستایی هماهنگ نیست.

پی‌نوشت‌ها

۱. استفاده از نتایج این نوشتار وابسته به مکان خاصی نیست؛ اما به‌دلیل اینکه این گونه رواج بیشتری در روستاها، مانند روستاهای منطقهٔ ماهان کرمان، دارد، تمرکز این نوشتار بر معماری روستایی است.

۲. پیکره‌بندی (Configuration) به‌معنای نحوهٔ توزیع جرم و سختی با توجه به هندسه تعریف می‌شود که در مقالهٔ حاضر، موضوع بحث توزیع جرم در هندسهٔ مقطع است.

۳. برای مثال درحالی‌که در منطقهٔ ماهان کرمان، پلان یک خانهٔ روستایی با شش اتاق به‌طور متوسط ۱۵۰ متر مربع مساحت دارد، پلان پیشنهادی تیپ بنیاد مسکن ۶۰ متر مربع زیربنا دارد (نقشهٔ تیپ ۶۰ متری، تیپ دو ۱۴۰۰). (همچنین، ر.ک: ساخت خانهٔ ۶۰ متری با وام روستایی ۱۳۹۰).

۴. باید توجه داشت که احتمال اینکه یک استادکار سنتی چند زلزلهٔ ویرانگر را که غالباً با دورهٔ بازگشت طولانی رخ داده‌اند، مشاهده کرده باشد، پایین است. برای مثال، شهر بم از پیش از اسلام تا سال ۱۳۸۵ شمسی زلزلهٔ قوی را تجربه نکرده بود و پس از آن بود که تصحیحی در نقشهٔ پهنه‌بندی زلزله در این ناحیه انجام پذیرفت. ازاین‌رو، تجربهٔ مواجههٔ مستقیم و مکرر با زلزله، برای پیش‌بینی راهکار تأمین پایداری سازه، برای استادکار موجود نبوده و صرف‌نظر از خلأ موجود در پژوهش تاریخی، ممکن است توجه به پدیدهٔ زلزله دغدغهٔ اصلی و روزمرهٔ همهٔ استادکاران نبوده باشد.

۵. در هر دو حالت، در تناسبات مرسوم، فروریختگی با تشکیل یک مفصل مومسان در پایهٔ پشت به زلزله و سه مفصل در قوس و چرخش پایه به بیرون رخ می‌دهد.

۶. برای شرح تاریخچهٔ این موضوع، ر.ک: Huerta 2001.

۷. منبع ذکرشده، مبنایی مهم برای درک مبانی رفتار سازه‌های طاقی در قالب طرح مومسان سازه‌هاست.

۸. منبع یادشده، با هدف آموزشی، روش ترسیم فونیکولار را به‌صورت مشروح بیان می‌کند.

9. Rich

10. Rhino Vault

۱۱. سه منبع اخیر، کاربردی‌ترین منابع برای حل مسائل قوسو بر روی پایه هستند. دو منبع اول برمطالعهٔ عددی و منبع سوم برای طرح مبانی تحلیل پارامتریک تمرکز دارند.

۱۲. این منبع شرح کاملی از روش تحلیل فونیکولار در تحلیل معادل استاتیکی ارائه می‌دهد.

منابع

ـ *آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰*. ۱۳۹۷. تهران: مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی.

ـ ایزدپناه، فرزین، و الهام السادات علمداری. ۱۴۰۳. بررسی حد نهایی پایداری طاق‌آهنگ بر روی پایه در برابر شتاب افقی ثابت زمین موازی صفحهٔ قوس. فصلنامهٔ *علوم و مهندسی زلزله* ۱۱ (۴)، ۶۵ـ۸۷.

ـ ایزدپناه، فرزین، و عیسی حجت. ۱۴۰۰. تأملی بر چالش‌ها و راهکارها در آموزش مکانیک سازه در معماری برای نوآموزان. *مطالعات معماری ایران* ۱۰ (۱۹)، ۱۳۷ـ۱۶۴.

ـ ساخت خانهٔ ۶۰ متری با وام روستایی. ۱۳۹۰.

(دسترسی در تاریخ ۱۴۰۵/۴/۱۸) ۲۱۶۷۷۰/ساخت-خانه-۶۰-متری-با-وام-روستایی/https://www.tabnak.ir/fa/news

ـ *نقشهٔ تیپ ۶۰ متری، تیپ دو*. ۱۴۰۰. تهران: بنیاد مسکن انقلاب اسلامی. معاونت امور بازسازی و مسکن روستایی. دفتر فنی و نظارت و ارزیابی.

-Allen Edward et al .2010 .*Form and Forces*. New Jersey: Willey and sons.

- Arya, Anand S. 1987. Protection of educational buildings against earthquakes: a manual for designers and builders. E*ducational Building Report 13 [20]. Thailand: UNESCO Principal Regional Office for Asia and the Pacific (Thailand).*

- Block, Ph. 2003. Equilibrium systems: Studies in Masonry Structure, Master of Science thesis in Architecture Studies, Massachusetts Institute of Technology, June 2005.

- 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.

- Clemente, P. 1998. Introduction of stone arches. *Int. J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics* .513-522 :(27)

- De Jong, M. J. 2009. *Seismic assessment strategies for Masonry Structures. Ph.D. thesis. Massachusetts institute of technology.*

- Heyman, J. 1966. The Stone Skeleton. *Int. J. of Solids Structures* (2): 249-279.

- Huerta, S. 2001. Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach. *Historical Constructions*, P.B. Lourenço, and P. Roca (Eds.): 47-70.

- Huerta, S. 2006. Galileo Was Wrong: The Geometrical Design of Masonry Arches. *Nexus Network journal* 8 (2): 25-51.

- Li, W., X. Chen, H. Wang, A. H. Chan, and Y. Cheng. 2021. Evaluating the seismic capacity of dry-joint masonry arch structures via the combined finite-discrete element method. *Applied Sciences 11 (18): 8725.*

- Martín-Sáiz, R., and B. Herrera. 2025. Estimating the Minimum Thickness of Earthquake-Resistant Vaults and Catenary Arches by Using a Hanging Chain. Nexus Netw J 27: 639-661 . https://doi.org/10.1007/s00004-025-00816-0.

- Michiels., Tim L. 2018. *Form Finding oF Arches and Shell Structures Subjected to Seismic Loading*, Ph.D Dissertation. Princeton: Princeton University. Civil and Environmental Engineering.

- Misseri, G., M. J. DeJong, and L. Rovero. 2018. Experimental and numerical investigation of the collapse of pointed masonry arches under quasi-static horizontal loading. *Engineering Structures, no. 173: 180-190.*

- Murty and Goswami and Vijayanarayanan and V. Mehta, Some Concepts in Earthquake Behavior of Buildings, (India: Gujarat State Disaster Management Authority, 2012): 9.

- Nienhuys, Sjoerd. 2010. *Galvanized Wire Reinforcement (GWR) Technology: Earthquake Reinforcement for Non-Engineered Stone and Earth Constructions. Edited by: Doreen Nienhuys. International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE-2010), Skandy, 13-14 December 2010.*

- Ochsendorf, J. 2005. *Collapse of masonry structure*. Ph.D. thesis. Cambridge University.

- Oppenheim, I. J. 1996. *Earthquake Analysis of Masonry Structure. 11th conference on Earthquake Engineering.*

Enhancement of Lateral Stability Threshold of Barrel Vault Supported by Walls

Farzin Izadpanah
Assistant Professor, Department of Architecture, Shahid Bahonar University of Kerman

The configuration, which refers to the mass distribution within masonry structures consisting of barrel vaults and walls, plays a crucial role in the primary mode of collapse for these structures, specifically the out-of-plane failure. The present article focuses on designing an appropriate configuration for such rural structural types in Iran, with the objective of enhancing their lateral stability threshold. To this end, the study initially examines the impact of three traditional stabilization techniques employed by master builders, including the thickening of the haunch of the arch, utilization of inclined piers, and implementation of seat platforms, on the lateral stability of the structure. Then, employing these methods and choosing an appropriate angle of embrace for the arch, efforts are made to enhance the lateral stability of current structures, which is below 0.1g, to levels of 0.35g, 0.5g, and 0.65g. Additionally, the cross-sectional areas of the structures and their designs are suggested for optimal planning and the selection of fitting architectural styles. The findings indicate that the goals for lateral stability may be realized through the various options presented in this paper. The utilization of inclined piers, useful for optimization in some proportions, may also increase the threshold of lateral stability in other cases. The responses are also very sensitive to the selection of geometry of sections based on other aforementioned techniques. The alternative configurations presented here can be implemented by designers.

Keywords: Configuration of Masonry Structures, Lateral Stability, Arch and Pier, Limit state Analysis.

JIAS

Journal of Iranian Architecture Studies

University of Kashan
School of Architecture and Art

29

Vol. 29, Spring and Summer 2026
E-ISSN: 2676-5020

- **Historiography of the Architecture of Masjed-e Jāme' (Grand Mosque) of Amol and Its Relationship with the City in the Early Centuries after the Hijrah**
  Zatollah Nikzad
- **Redefinition of the Qaysariyyah Area in the Bazaar of Kashan and the Formation of a New Urban Center in the Second Half of the Qajar Period**
  Yasaman Safian, Hamidreza Jayhani, Seyed Mahmood Sadat Bidgoli
- **Assessing the Values of Rudkhan Castle as World Heritage from the Perspective of the ICOFORT Charter and the Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention**
  Aboozar Janalipoor, Pirouz Hanachi, Mohammad-Hassan Talebian
- **Enhancement of Lateral Stability Threshold of Barrel Vault Supported by Walls**
  Farzin Izadpanah
- **Evaluation of the Performance of Brick Lattice Screens in Controlling Solar Radiation and Daylight in the Hot and Semi-Arid Climate of Dezful**
  Kolsoom Kamkar, Kourosh Momeni, Akbar Mousaeijoo
- **From Royal Garden to Urban Square: The Emergence of the Mahjar and the Reconfiguration of the Iranian Cityscape in the Late Naseri Era**
  Kaveh Rashidzadeh, Golnar Hekmat
- **Classification and Algorithmic Analysis of Articulation Types in Historical Iranian Girih Patterns**
  Mahdi Azizi Hamedani, Mojtaba Sabetfard
- **Conceptual Dimensions and Characteristics of Abductive Reasoning in Design Practice**
  Ali Qoreishvandi Abraki, Ali Alai, Keivan Jourabchi, Saeid Norouzian Maleki
- **The Role of Spatial Configuration in Creating Sociability in Social-Scale Shopping Centers in Isfahan**
  Maryam Gorouhi, Narges Dehghan, Mansoureh Kianersi, Somayeh Rafiei
- **Pragmatic Evaluation: An Opportunity to Reform Policies and Practices in Targeted Areas (Concrete Case: National Regeneration Policy in Iran)**
  Morteza Hadi Jaberi Moghaddam, Shima Saghandali
- **From Eventification to Characterization of Memorial Museums**
  Faezeh Tafreshi, Manoochehr Moazzami, Nicholas Wise
- **The Effect of Removing Old-Growth Trees in the Architecture of Ilam's Streets on Pedestrian Thermal Comfort Changes Based on Computational Fluid Dynamics (CFD)**
  Karen Fatahi, Nasrin Siavash