آموزش رفتار سازه‌های با مصالح بنایی به دانشجویان کارشناسی معماری با استفاده از مدل بلوک‌های صلب متعادل*

علمی پژوهشی

فرزین ایزدپناه**
عیسی حجت***

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

چکیده

با وجود آنکه مسئلهٔ سازه‌های با مصالح بنایی یکی از حوزه‌های مهم و چالش‌برانگیز است، توجه کافی به آن در حوزهٔ آموزش سازه در معماری وجود نداشته است. نوشتار حاضر نتیجهٔ تلاش‌های انجام‌شده برای پر کردن این خلأ را منعکس می‌کند که در قالب یک اقدام‌پژوهی چهارساله، در پارادایم ممارست و از طریق انجام چرخه‌های آموزشی مکرر صورت پذیرفته‌اند. این پژوهش بر آموزش رفتار این سازه‌ها در سطح مقدمات متمرکز است و در پی پاسخ‌گویی به این مهم است که چگونه می‌توان نحوهٔ رفتار سازه‌های با مصالح بنایی را برای دانشجویان کارشناسی معماری بیان نمود؟ و مدل این آموزش چگونه می‌تواند شکل گیرد؟ راهبرد اتخاذشده در مسیر، مطالعهٔ تجربی و از طریق مشاهدهٔ حرکت (مطالعهٔ سینماتیک) مدل بلوک‌های صلب در قالب تحلیل و طراحی در حالت حد نهایی است. اثر دو عامل ناپایدارکنندهٔ نشست و زلزله بر روی مجموعهٔ قوس و پایه، با رویکردی مبتنی بر جابه‌جایی، در این مسیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشاهده شد که در راستای هدف آموزش رفتار سازه‌های با مصالح بنایی، برخی از مفاهیم پایه و مسائل تحلیل حدی، چون تسلیم، وقوع مفاصل مومسان و وابستگی حد نهایی و محل مفاصل مومسان به تناسبات هندسی سازه، از طریق بررسی حرکتی مدل‌های بلوک صلب قابل طرح هستند. مدل آموزشی پیشنهادی مبتنی بر آزمایش دانشجویان بر روی مدل‌های فیزیکی و دنبال کردن مرحله به مرحلهٔ پرسش‌های هدایت‌شدهٔ مدرس است که بر مشاهده تأکید دارند. نتایج این نوشتار می‌تواند به مدرسان برای تلاش در زمینهٔ بهبود آموزش این حوزه توجه دهد.

کلیدواژه‌ها:

سازه‌های با مصالح بنایی، رفتار سازه‌ای، آموزش سازه در معماری، مدل بلوک‌های صلب، تحلیل در حالت حد نهایی.

مطالعات معماری ایران
دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۲ ـ پاییز و زمستان ۱۴۰۱
صفحات ۵۳-۳۱ ۳۱

* مقالهٔ حاضر برگرفته از رسالهٔ دکتری نویسنده اول با عنوان *تأملی بر مدل آموزش مقدمات معماری با تکیه بر جنبه‌های ساختاری* در دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران است.

** دانشجوی دکتری معماری، دانشگاه تهران و عضو هیئت‌علمی دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، نویسندهٔ مسئول، Fizadpanah@uk.ac.ir

*** استاد، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران

پرسش‌های پژوهش

۱. چگونه می‌توان نحوهٔ رفتار سازه‌های با مصالح بنایی را برای دانشجویان کارشناسی معماری در سطح مقدمات در چهارچوب تحلیل حدی طرح نمود؟

۲. مدل آموزشی این مبحث چگونه می‌تواند شکل بگیرد؟

مقدمه

سازه‌های با مصالح بنایی بخش بزرگی از میراث تاریخی جهان را شکل داده و در دوران معاصر نیز گروهی از مردم جهان در این سازه‌ها سکونت دارند. از سوی دیگر، به‌دلیل مزایای اقلیمی این سازه‌ها و همچنین طبیعت‌دوستی آن‌ها، به‌عنوان سازه‌های آینده نیز مورد توجه پژوهش‌ها هستند (نک: Block 2022). ازاین‌رو توجه به این حوزه و آموزش آن حائز اهمیت است.

این زمینه در عین گستردگی و رواج، حوزه‌ای متفاوت در طراحی و تحلیل سازه و بالتبع آموزش است، که تعمقی بیش از پیش می‌طلبد. علاوه بر این، به‌دلیل رواج سازه‌های مدرن و روش‌های تحلیلی مبتنی بر آن‌ها، غفلتی در دوران معاصر در حوزهٔ درک رفتار سازه‌های بنایی وجود داشته است. برای مثال، اوشندورف (Ochsendorf 2004) اشاره می‌کند که مسئلهٔ آشنا و مرسومی چون حد نهایی پایداری قوس بر اثر حرکت پای آن، در انتهای قرن ۲۰ میلادی و بسیار دیرهنگام در قیاس با تاریخ مهندسی سازهٔ نوین، مورد بررسی قرار گرفته است. این حوزه در زمینهٔ تحلیل سازه و همین‌طور آموزش، حوزه‌ای نوپا در مهندسی نوین محسوب می‌شود.

به‌رغم سکونت گروه بزرگی از مردم ایران در ساختمان‌های با مصالح بنایی و میراث تاریخی غنی ایران در این حوزه، در برنامهٔ آموزش سازه در معماری، توجه بسزایی به این سازه‌ها وجود نداشته است. برای مثال، زمانی که دانشجویان در درس روستا، که به‌منظور توانمندسازی آن‌ها در زمینهٔ معماری روستایی پیش‌بینی شده است، یا در دروس مرتبط با مرمت، باید دربارهٔ طراحی و مداخله در معماری بومی تصمیم‌گیری کنند، فاقد دانش ورودی لازم دربارهٔ این سازه‌ها هستند. شرایط فعلی آموزش این سازه‌ها نیازهای یادگیری دانشجویان را تأمین نمی‌کنند.

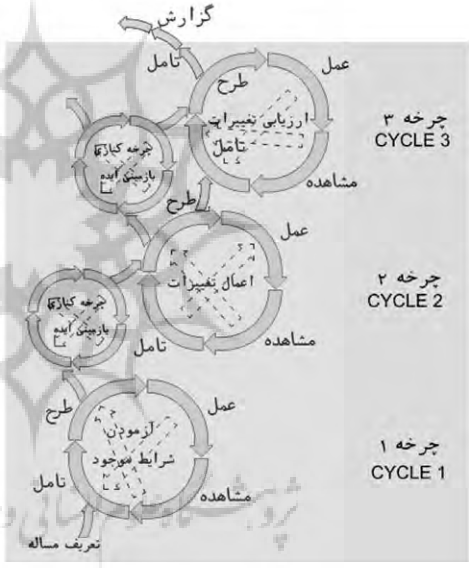
با توجه به اهمیت ذکرشده و غفلت موجود، تلاش کرده‌ایم مدلی در جهت بهبود درک رفتار این سازه‌ها در سطح آموزش مقدمات سازه در معماری، طراحی، ارزیابی و پیشنهاد دهیم. همچنین تلاش شده است یافته‌های پژوهشی جدید این حوزه، برای آموزش در سطح مقدماتی، مناسب‌سازی شوند. امکان گسترش و تعمیق این مدل آموزشی، و امکان پیوند آن با سطوح بالاتر آموزشی، که لازمهٔ هر برنامهٔ مقدماتی است، نیز مدنظر این پژوهش بوده است. محدودهٔ پژوهش آموزش مقدماتی درک رفتار این سازه‌ها، بدون تحلیل هندسی و عددی و در قالب نظریهٔ مومسان و روش تحلیل در حالت حد نهایی است. پژوهش ساختمان‌های بنا شده با سازه‌های بنایی غیرمسلح را که غالباً تحت اثر وزن خود هستند، در بر می‌گیرد و سایر سازه‌ها چون پل‌های با مصالح بنایی در حوزهٔ مطالعهٔ حاضر نیستند.

در ادامه، پس از طرح روش تحقیق و بررسی تلاش‌های انجام‌شده در این زمینه، مبانی نظری روش سازه‌ای را بیان می‌کنیم. بعد از شرح اجمالی مدل آموزشی، این مدل را که متمرکز بر بررسی رفتار سازهٔ متشکل از قوس و پایه در نشست و زلزله است به‌صورت مشروح بررسی می‌نماییم.

۱. روش پژوهش

طراحی مدل در قالب یک اقدام پژوهشی چهارساله، در پارادایم ممارست[1] انجام پذیرفته است. روش استفاده‌شده در پژوهش حاضر متأثر از الگوهای جدید تفسیری مانند روش پیشنهادی پیگوت ـ اروین (Piggot-Irvine 2002) بوده است. این روش مبتنی بر انجام سه چرخهٔ اصلی است که هر چرخه متشکل از تأمل، طرح، عمل و مشاهده است (تصویر ۱). در این روش، پژوهش با درگیری مدرس در شرایط معمول تدریس، برای بررسی شرایط موجود و یافتن

ایده آغاز می‌شود (چرخهٔ اول)؛ سپس ایدهٔ وی برای حل چالش‌های موجود، نخست در یک چرخهٔ کناری آموزشی، چرخه‌ای جنبی و محتاطانه برای طراحی اولیهٔ آموزشی، به جریان می‌افتد و شکل می‌گیرد (تصویر ۱). طراحی حاصل از این چرخهٔ کناری، در چرخهٔ آموزشی دوم، به‌منظور «اعمال تغییرات» در برنامهٔ جاری و موجود به کار گرفته می‌شود. در نهایت، چرخهٔ آموزشی سوم برای «ارزیابی تغییراتِ انجام‌شده در برنامه» انجام می‌شود. این پژوهش در شش نیم‌سال تحصیلی انجام پذیرفت و ۱۸۰ دانشجوی کارشناسی معماری در این برنامه شرکت داشتند. برنامه به‌صورت مکتوب و با توضیح روش انجام آن و سؤال‌های مرتبط به دانشجویان ارائه می‌شد. نتایج به‌صورت فیلم، عکس و پاسخ مکتوب به سؤال‌ها جمع‌آوری می‌شدند و مورد ارزیابی قرار می‌گرفتند. بعد از انجام هر چرخهٔ آموزشی، با توجه به خطاهای یادگیرندگان، در برخی از موارد برنامه تجدید نظر می‌شد و برنامهٔ اصلاح‌شده در چرخهٔ بعدی به جریان می‌افتاد. پژوهش حاضر مورد خودارزیابی، ارزیابی توسط هم‌قطاران دانشگاهی و گروه متخصصان برجستهٔ دانشگاهی از رشته‌های معماری و سازه قرار گرفت و اصلاحات لازم در چرخه‌های بعدی اعمال و مجدداً ارزیابی شدند. (اصلاحات به‌فراخور در نوشتار ارائه می‌شوند.) مقاله به سنت اقدام‌پژوهی که پژوهش متمرکز بر من[۲] می‌باشد، به‌صورت اول‌شخص گزارش شده است.



تصویر ۱: مدل اقدام‌پژوهی پژوهش حاضر برگرفته از روش پیشنهادی پیگوت ـ اروین (Piggot-Irvine 2002)

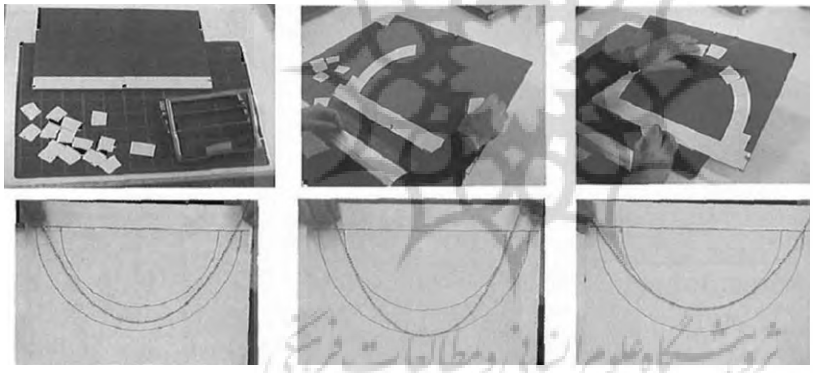
۲. پیشینه

گری بلک و داف (Gary Black and Duff 1994) در بیانیهٔ خود دربارهٔ تجدیدنظر در آموزش سازه در معماری، اشاره می‌کنند که گرچه مناسب است این آموزش کیفی و نه کمّی باشد، باید توسط یک نظریهٔ صحیح سازه‌ای حمایت شود، که نیاز به این امر در خلال پژوهش حاضر نیز لمس شد و مورد توجه قرار گرفت.

تحلیل سازه‌های با مصالح بنایی به‌دلیل تفاوت رفتار آن‌ها با سازه‌های جدید، مسئله‌ای متفاوت در طراحی سازه است. نظریه‌های سازه‌ای کشسان (الاستیک) و مومسان (پلاستیک) از طریق روش‌های گوناگونی چون تحلیل در حالت حد نهایی با روش ترسیمی یا عددی، اجزای محدود و اجزای منفرد در این مسیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نوشتار، تحلیل و طراحی در حالت حد نهایی (در قالب نظریهٔ مومسان) را که نخستین مدخل ورود پژوهش‌های دانشگاهی به این موضوع بوده است، مورد توجه قرار می‌دهد. هورتا (Huerta 2001) اشاره می‌کند که نظریهٔ مومسان زمینه‌ای خلاقانه و واقعی برای فهم، تحلیل و آموزش سازه‌های سنتی فراهم آورده است: در مقابل، سیطرهٔ

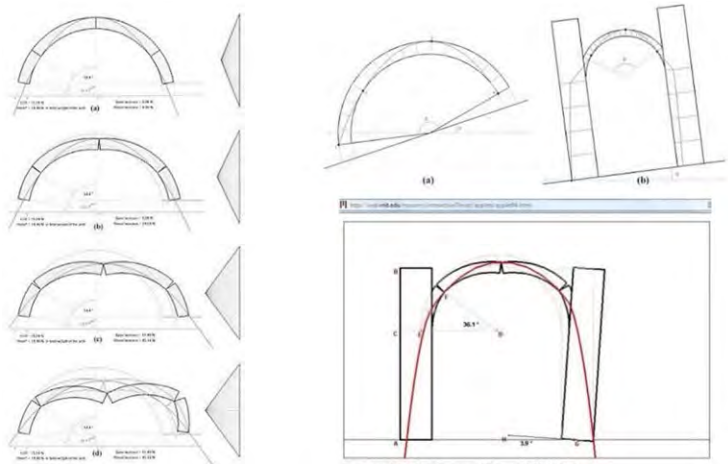
نظریهٔ کشسان (الاستیک) (طراحی و تحلیل در زیر حد تسلیم یا ترک‌خوردگی) در فهم این سازه‌ها نقشی بازدارنده و گمراه‌کننده داشته است؛ نظریهٔ کشسان پاسخی صحیح به مسائل سازه‌های سنتی که متشکل از مصالح ناهمگن و ترک خورده‌اند، نمی‌دهد. از سوی دیگر، در روش‌هایی چون تحلیل اجزای محدود غیرخطی که وابسته به تعیین مشخصات دقیق مصالح و اندازه‌گیری تنش‌ها هستند، نمی‌توان از ماکت‌های کوچک‌مقیاس متناسب با مدل اصلی برای درک رفتار سازه‌ها استفاده نمود و در این حال، مدرس باید برای بررسی هر مورد، تناسبات مدل و مشخصات مادهٔ سازندهٔ آن را بر اساس محاسبات ریاضی، معادل‌سازی کند که کار تدریس را پیچیده می‌کند. برای حل مشکل، برای مثال در برنامهٔ تدریس در دانشگاه برکلی (نک: Gary Black and Duff 1994) که مبتنی بر روش اجزای محدود است، تمام فرایند آموزشی به رایانه واگذار می‌شود. البته از دیدگاه ما در این حالت، امکان تجربهٔ ملموس از طریق مدل فیزیکی از دانشجو سلب می‌شود. (البته مشخص است که ما طراحی شیوهٔ آموزشی مناسب در سایر روش‌ها را محترم می‌شماریم.)

در حوزهٔ آموزش مبتنی بر تحلیل حد نهایی، هورتا (Huerta 2005) با استفاده از بررسی مدل مقوایی بر روی یک شاسی مایل، توضیح مفهوم زنجیر آویخته مدل زنجیر آویختهٔ هوک[۳] و ایدهٔ دوران صفحهٔ زمین برای معادل‌سازی اثر زلزله به آموزش مقدماتی این سازه‌ها می‌پردازد (تصویر ۲). هورتا اشاره می‌کند که فهم یک نظریهٔ متفاوت که از قواعد نظریه‌های سازه‌ای روزمره پیروی نمی‌کند، دشواری‌هایی دارد. وی می‌گوید که «بعد از پانزده سال، دریافتم که ساخت مدل‌های ساده در فهم رفتار سازه‌های سنتی بسیار مهم است». این مدل‌ها برای تدریس و فهم فرض‌های اساسی، فهم بهتر قضایای اساسی تحلیل حدی و آرایش ترک‌ها در سازه‌های سنتی ارائه شده‌اند.



تصویر ۲: روش پیشنهادی هورتا برای آموزش رفتار قوس با صفحات مقوایی و منحنی زنجیره‌ای (Huerta 2005)

تحلیل در حالت حد نهایی و آموزش آن از طریق استاتیک ترسیمی (چندضلعی فونیکولار) نیز مورد توجه بوده است (تصویر ۳). استاتیک ترسیمی که روش غالب طراحی سازه‌ها قبل از قرن بیستم میلادی بوده، در سال‌های اخیر، با تلاش‌های آلن و همکاران (Allen et al. 2010) احیا شده است. نکتهٔ دشوار در انجام استاتیک ترسیمی در گذشته، حالت استاتیکی آن و بی‌توجهی به تغییر شکل‌های سازه در طول زمان بوده است؛ این تغییر شکل‌ها منجر به رفتار غیرخطی و تغییر مسیر نیرو در سازه می‌شوند. در انتهای قرن بیستم، پژوهشگران در ام. ای. تی[۴] (De Jong 2009؛ Block et al. 2006) به توسعهٔ مدل‌های پارامتریک رایانه‌ای پرداخته و امکان تحلیل سریع گروهی از سازه‌های مشابه را ایجاد کرده‌اند که در آموزش نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این پژوهشگران شیوه‌هایی با تبادل دوسویهٔ اطلاعات ابداع کرده‌اند که تغییرات هندسی در هنگام تغییر شکل‌های ناشی از نشست و زلزله را در قوس مدنظر قرار می‌دهند (تصویر ۳). این روش تحلیلی اثر زلزله را به‌عنوان بار استاتیکی معادل و به‌صورت یک حرکت دورانی معادل مورد توجه قرار می‌دهد که در ادامه، شرح دقیق‌تری از آن خواهیم داد. مفاهیم ریاضی مورد نیاز، در این مدل ساده هستند و از چهار عمل اصلی و هندسه و مثلثات مقدماتی فراتر نمی‌روند. البته باید توجه نمود که حتی در فعالیت‌های انجام‌شده در سطوح بالای حرفه‌ای و پژوهشی، در کنار مدل تحلیل هندسی، از مدل فیزیکی استفاده شده است.



تصویر ۳: آموزش با تعامل دوسویه در دانشگاه ام. ای. تی. چپ: تحلیل سینماتیک قوس. راست بالا: مدل‌سازی اثر زلزله. راست–پایین: اثر دوران پایه در نشست بر پایداری سازه (Block et al 2006)

نیل بی. میچل (Neal B. Mitchell 1961) برنامه‌ای برای آموزش سازه در معماری، شامل سازه‌های با مصالح بنایی، در دانشگاه تافتس[۵] معرفی می‌کند که مبتنی بر طرح و تحلیل حدی در نظریهٔ مومسان است. وی روش کار مجازی[۶] را برای آموزش مناسب تشخیص می‌دهد. دو برنامهٔ اخیر، یعنی برنامه‌های دانشگاه تافتس و ام.ای.تی. تحلیل دقیق ریاضی را مدنظر قرار می‌دهند و استفاده از آن‌ها در سطوح مقدمات در ایران بحث‌برانگیز است.

در کتاب *مبانی سازه‌ای معماری* (Sandaker et al. 2013)، نکاتی دربارهٔ رفتار سازه‌های با مصالح بنایی ذکر شده است که به‌فراخور در ادامهٔ مقاله، به آن‌ها خواهیم پرداخت. همچنین در مطالعهٔ گری بلک و داف (Gary Black and Duff 1994) بر روی آموزش سازه در معماری، توصیه‌های کلی ارائه شده است که در مسیر معرفی مدل، نحوهٔ بهره‌گیری از آن‌ها را شرح خواهیم داد.

۳. مبانی نظری

دانش استادکاران سنتی مبتنی بر ایجاد پایداری کلی (حفظ تعادل سازه) بوده است؛ یعنی پذیرش وقوع ترک و تسلیم در نقاطی از سازه، به‌شرط آنکه پایداری کلی بنا را به خطر نیندازد، مسئله‌ای عادی در نزد استادکاران بوده است.[۷] هیمن (Heyman 1966) نخستین بار این نگاه را در چهارچوب «تحلیل حدی» در نظریهٔ مومسان سازه‌ها در محیط دانشگاهی بیان نموده است: «تحلیل در حالت حد نهایی، با پذیرفتن امکان تسلیم در نقاطی از سازه، بدون نیاز به بررسی تمام تاریخچهٔ بارگذاری سازه، هدف نهایی خود را متوجه بررسی بار فروریختگی [بار منجر به از دست رفتن تعادل] سازه می‌کند» (بیکر و هیمن ۱۳۹۱). (در حوزهٔ بحث سیر تاریخی این موضوع و مبانی پایه، هورتا (Huerta 2001)، متخصص تاریخ ساختار، اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌دهد.)

سه گونه معادلهٔ سازه‌ای وجود دارند که می‌توانند برای تحلیل مورد استفاده قرار گیرند: تعادل،[۸] سازگاری[۹] و معادلات مرتبط با مصالح (تنش‌ها). در سازه‌های با مصالح بنایی تاریخی، گونهٔ اول مهم‌ترین است: «به‌دلیل اینکه به‌طور کلی، تنش‌ها [بی فشاری] در سازه‌های با مصالح بنایی، مقداری کمتر از تنش گسیختگی یا شکست مصالح بنایی دارند. ازاین‌رو یک راهبرد مبتنی بر پایداری و تعادل، برای تخمین ایمنی سازه‌های با مصالح بنایی، بسیار باارزش‌تر از تحلیل تنش‌هاست» (Block et al. 2006): زمانی که مسئلهٔ سازه‌های جدید مقاومت، تغییر شکل و پایداری هستند، مسئلهٔ سازه‌های سنتی، پایداری است (Huerta 2001).

تحلیل و طراحی در حالت حد نهایی در حوزهٔ مصالح بنایی بر سه فرض استوار است که به فرض‌های هیمن

منسوب‌اند: مصالح بنایی مقاومت فشاری مناسبی دارند، مقاومت کششی ندارند، و اصطکاک بین آن‌ها برای جلوگیری از لغزش مصالح کافی است. با این فرض‌ها، مسئلهٔ تحلیل و طراحی به بررسی پایداریِ بلوک‌های صلب (حفظ تعادل آن‌ها بر روی یکدیگر) منتهی می‌شود. فرض مقاومت کششی صفر محافظه‌کارانه و کاملاً ایمن است و فرض‌های اول[۱۰] و سوم در حالات خاصی ممکن است مخدوش شوند که به‌عنوان تذکراتی در خلال آموزش ارائه خواهند شد. (اما بررسی دقیق‌تر این حالات خاص، باید به سطوح بالاتر آموزشی منتقل شود.)

دو قضیهٔ پایه در این شیوهٔ تحلیل مورد توجه هستند که توسط هیمن بیان شده‌اند (نک: بیکر و هیمن ۱۳۹۱). قضیهٔ نخست بیان می‌کند چنانچه تنها یک مسیر نیرو در سازه وجود داشته باشد که از طریق آن، نیروها صورت ایمن منتقل شوند، حتی اگر این مسیر توسط تحلیلگر قابل تشخیص نباشد (نامعینی سازه) سازه پایدار است؛ این قضیه به «قضیهٔ حد پایین» معروف است (در حوزهٔ سازهٔ بنایی، یک مسیر نیرو که بلوک‌ها را در تعادل با یکدیگر قرار دهد). «قضیهٔ حد بالا» بیان می‌کند که چنانچه تنها یک مسیر نیرو در سازه وجود داشته باشد و با همان مسیر، سازه در آستانهٔ تبدیل به مکانیسم فروریختگی باشد، سازه به حد نهایی پایداری خود رسیده است.

مسئلهٔ دیگر شکل‌پذیری در سازه‌های با مصالح بنایی است. بخشی از توان شکل‌پذیری در سازه‌های فولادی و بتن مصالح به‌دلیل استهلاک انرژی به‌دلیل تسلیم مصالح[۱۱] است؛ اما در سازه‌های تاقی، شکل‌پذیری محصول تغییر شکل‌های نسبتاً بزرگ هندسی، (گاه تا حدود ۳۰ سانتی‌متر در یک کلیسای گوتیک) بعد از تسلیم نقاطی از سازه است (Heyman 2008).

اوشندورف (Ochsendorf 2005) اشاره می‌کند که برخلاف روند غالب پیشینهٔ پژوهش در این حوزه، تحلیل بناهای تاریخی قوسی باید «مبتنی بر جابه‌جایی»[۱۲] و نه «مبتنی بر بار»[۱۳] باشد (صرف‌نظر از روش اتخاذشده برای تحلیل). غیر از حالت پل‌های بنایی راه‌آهن که در معرض بارهای سنگین، غیر از وزن خود، مثلاً بار نقطه‌ای حاصل از عبور چرخ قطار هستند، بناها عموماً تحت اثر وزن خود هستند. ازاین‌رو از دیدگاه وی، بارگذاری اضافه بر وزن، برای مثال، قرار دادن یک بار نقطه‌ای بر روی یک قوس، برای آزمون پایداری این سازه‌ها، در اکثر مواقع، آزمونی نامربوط است. از سوی دیگر، تحلیل ساختمان بنایی در وضع ایستا (استاتیکی) حتی برای بار وزن نیز قابل اتکا نیست؛ زیرا با تغییرات هندسی در طول زمان ممکن است سازه تحت اثر بار وزن خود، هرآن فروریزد. ازاین‌رو بررسی این بناها باید مبتنی بر آثار ناشی از جابه‌جایی (مانند نشست) و به‌صورت مطالعهٔ هندسهٔ حرکت (سینماتیک) باشد (Ochsendorf 2005). از سوی دیگر، مسیر نیرو، ترک‌ها و مفاصل مومسان در سازهٔ بنایی با تغییر شکل سازه و ایجاد شرایط تعادل جدید، امکان جابه‌جایی دارند. پس، تحلیل و آموزش نمی‌تواند منحصراً در یک حالت تعادل ایستا انجام پذیرد و توجه به اثر تغییر شکل‌های هندسی (موسوم به اثرات مرتبهٔ دوم) در سازهٔ سنتی مهم است. اوشندورف (Ibid) در این مورد، مسائل دقیقی را بیان می‌دارد که در طراحی مدل آموزشی این نوشتار حائز اهمیت هستند و در مدل مورد استفاده و اشاره قرار خواهند گرفت.

برخلاف تحلیل مبتنی بر مقاومت مصالح که در آن، امکان تغییر مقیاس مدل با حفظ تناسبات، به‌دلیل افزایش مخرب تنش‌ها (قانون موسوم به توان دوم ـ سوم گالیله[۱۴]) نمی‌باشد، تحلیل مبتنی بر پایداری مقیاس‌پذیر است (Huerta 2006).[۱۵] کلمنته (Clemente 1998) اشاره می‌کند که استادکاران گوتیک و رومانسک با ساخت ماکت کوچک‌مقیاس، با همان تناسبات سازهٔ اصلی، پایداری بناهای خود را بررسی می‌کرده‌اند. ازاین‌رو می‌توان برای فهم رفتار سازه در این حالت، از مدل فیزیکی یا هندسی آن در مقیاس کوچک‌تر استفاده نمود. از سوی دیگر، هوسنر (Housner 1963) و دی جونگ (De Jong 2009) نشان می‌دهند که برخلاف برداشت اولیه از قانون گالیله، رفتار دینامیکی سازه‌های متشکل از بلوک‌های صلب، با افزایش مقیاس سازه با حفظ تناسب بهبود می‌یابد؛ که این امر نیز نگرانی از به کار بردن مدل‌های کوچک مقیاس را برطرف می‌نماید.

با توجه به مطالب طرح‌شده مسائل کلیدی پایداری، تحلیل با رویکرد مبتنی بر جابه‌جایی، مطالعهٔ حرکت و امکان استفاده از مدل فیزیکی با مقیاس کوچک برای طراحی برنامهٔ حاضر مورد توجه بوده‌اند.

٤. بررسی اجمالی مدل آموزشی

هدف‌های کلی این مدل آموزشی را می‌توان آشنایی با رفتار سازه‌های با مصالح بنایی به‌صورت مجموعهٔ متعادلی[۱۶] از بلوک‌های صلب، تحلیل مبتنی بر جابه‌جایی و تأثیر هندسه بر رفتار این سازه‌ها در برابر نشست و نیروی زلزله برشمرد.

راهکار اتخاذشده در مسیر مطالعهٔ شهودی و تجربهٔ حرکتی (سینماتیک) مدل فیزیکی است. تکنیک‌های به‌کاررفته ساخت مدل کوچک‌مقیاس و متناسب با سازهٔ واقعی و آزمون مبتنی بر حرکت مدل هستند. مطالب در اختیار دانشجو بیشتر متکی بر پرسش و دعوت به مشاهده‌اند و مطالب نظری حمایت‌کنندهٔ تمرین در اختیار مدرس بوده و مدرس نقش توجه دادن به ظرایف را بر عهده دارد. در این نوشتار، بعد از معرفی قسمت مرتبط با دانشجو، مطالب مرتبط با مدرس و مبانی تمرین مشروح بیان می‌شوند.

دانشجو نخست به بررسی تعادل قوس‌های نیم‌دایره و قطاع دایره می‌پردازد؛ سپس بر بررسی اثر نشست بر روی مجموعهٔ قوس و پایه متمرکز می‌شود. نحوهٔ تسلیم سازه و مکانیسم‌های فروریختگی آن و اثر تغییر هندسهٔ مدل بر این موارد، در این مرحله مطالعه می‌شود. در ادامه، اثر زلزله بر روی سازه به‌صورت اجمالی مورد بحث قرار گرفته و در گام بعدی، این اثر، با استفاده از روش دوران صفحهٔ زمین دقیق‌تر بررسی می‌شود و اثر تغییر هندسهٔ مدل بر پایداری لرزه‌ای مطالعه می‌شود. مورد مطالعه در بررسی اثر نشست و زلزله متشکل از قوس و پایه (مقطع تاق آهنگ بر روی دیوار) است. زمان پیش‌بینی‌شده برای اجرای برنامه به‌صورت گروهی، ۸ ساعت است. برای چیدن هر مدل فیزیکی، از یک گروه دونفره استفاده می‌شود و هم‌زمان، چندین مدل می‌توانند برپا و آزمایش شوند.[۱۷]

٤. ١. مطالعهٔ رفتار سازهٔ متشکل از قوس و پایه

برای مطالعهٔ رفتار سازه چند گام پیشنهاد کرده‌ایم. گام نخست بررسی قوس به‌صورت منفرد است، زیرا قوس بدون پایه در بخشی از تاریخ معماری رواج داشته است.

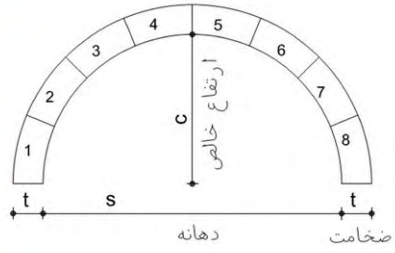
٤. ١. ١. مرحلهٔ اول: آشنایی با رفتار قوس

در ابتدا دانشجو به‌صورت مقدماتی با رفتار قوس نیم‌دایره و قطاع دایره آشنا می‌شود. هدف‌های عملیاتی این قسمت عبارت‌اند از:

ـ آشنایی با سازهٔ بنایی چون بلوک‌های صلب متعادل؛

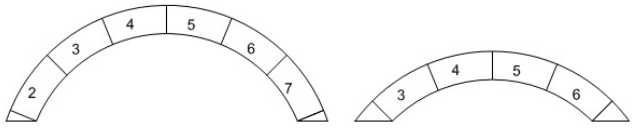
ـ آشنایی با اثر برخی مشخصات هندسی قوس در پایداری آن.

از دانشجو خواسته می‌شود که قوسی نیم‌دایره را با دو نسبت ضخامت t به دهانهٔ s به‌اندازهٔ ۱/۵ و ۱/۱۰ بر روی صفحهٔ یونولیت به ضخامت ۵ سانتی‌متر ترسیم کند و آن را به‌صورت شعاعی به هشت قسمت مساوی تقسیم و برش بزند (تصویر ۴). برای مثال، می‌توان دهانهٔ s را ۳۰ سانتی‌متر (مناسب کار بر روی میز شخصی دانشجو) انتخاب نمود؛ هرچند که مدل‌سازی وابسته به مقیاس نیست و امکان تغییر دهانه وجود دارد. دانشجو باید قطعات قوس را بدون چسباننده بر هم سوار کند تا متعادل بماند؛ سپس گزارشی از تجارب و مشاهده‌های خود ارائه دهد.



تصویر ۴: راست: هندسهٔ قوس. چپ: آماده‌سازی قطعات قوس بدون چسباننده. اثر دانشجو: کیمیا افلاطونیان، درس سیستم‌های ساختمانی، ۱۳۹۸

سپس، از دانشجو خواسته می‌شود با حذف دو بلوک ۱ و ۸ و سپس با حذف بلوک‌های ۱، ۲، ۷ و ۸ قطاعی از قوس را بچینند. با قرار دادن دو قطعهٔ گوه‌شکل در زیر پایه‌های قوس، عدم هماهنگی قطعات مایل با شاسی افقی برطرف می‌شود (تصویر ۵).



تصویر۵: استفاده از دو قطعهٔ گوه‌شکل برای ایستادن قوس قطاع دایره

دانشجو باید به سؤال‌های زیر پاسخ دهد:

ـ در چیدن قوس با چه مشکلاتی مواجه می‌شوید؟

ـ قوس‌های با نسبت‌های ضخامت به دهانهٔ بیشتر یا کمتر، کدام‌یک راحت‌تر چیده می‌شود؟

ـ کدام‌یک از قوس‌های با خیز کمتر (قطاع دایره) یا بیشتر (نیم‌دایره)، راحت‌تر چیده می‌شود؟

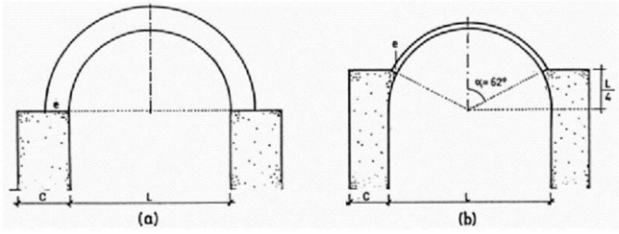
در ابتدای پژوهش در فرایند چرخه‌ها، ما با روش زنجیر آویخته و تحلیل‌های پارامتریک استاتیک ترسیمی[۱۸] و به‌کارگیری نوعی از زبان‌های عددی مانند «روش کار مجازی[۱۹]» آغاز به کار کردیم: روش‌هایی که در برنامه‌های نوین آموزش سازه در معماری، مانند آلن و همکاران (Allen and et al 2010) (برنامهٔ دانشگاه ام.ای.تی و ای.تی.اچ. زوریخ)، و نیل بی. میچل (Neal B. Mitchell 1961) (دانشگاه تافتس) در سال‌های اخیر معمول و مورد استفاده بوده‌اند. این مسیر اولیه دچار مشکلات جدی شد و بعد از بررسی گروه متخصصان نقدهای جدی بر آن وارد شد که محور اصلی آن‌ها «عدم آمادگی دانشجویان معماری ورودی دانشگاه‌های کشورمان برای جذب و فهم این مفاهیم و روش‌ها» بود (ایزدپناه و حجت ۱۴۰۰). با تجدیدنظر در ایده‌های اولیه و تأمل در بازخوردهای دانشجویان، به‌تدریج چرخشی در آموزش روی داد و برنامه به‌سمت ایدهٔ متمرکز بر تجربهٔ مدل‌های ساده حرکت نمود.

در این قسمت برنامه، دانشجو با مفهوم بلوک‌های صلب به‌مثابهٔ سازهٔ بنایی آشنا می‌شود: سازه، دارای فرم هندسه است که امکان تعادل بلوک‌ها را فراهم می‌کند.

به‌دلیل یکی از شرط‌های هیمن، یعنی مقاومت کششی صفر، بلوک‌ها بدون چسباننده روی هم چیده می‌شوند. همچنین با توجه به مقیاس‌پذیری، به‌منظور بررسی پایداری، مدل‌ها، کوچک‌مقیاس ساخته می‌شوند. استفاده از مصالح دیگری چون بتن و چوب هم برای ساخت مدل قوس امکان‌پذیر است، اما به‌دلیل دشواری عمل‌آوری و ساخت، معمولاً کار با آن‌ها به زمان زیادی نیاز دارد. از سوی دیگر فوم به‌دلیل ضریب اصطکاک پایین برای این کار نامناسب است. یونولیت علاوه بر سهولت برش، به‌دلیل ضریب اصطکاک بالا، حدود ۰/۷، نزدیک به مصالح بنایی، ماده‌ای مناسب برای این تمرین است (تأمین شرط عدم وقوع لغزش هیمن). نیازی به کوچک‌تر کردن بلوک‌ها، یعنی تقسیمات ریزترِ در قوس، برای مشابهت تعداد بلوک‌های مدل با قوس واقعی نیست. گرچه با کوچک کردن بلوک‌ها پایداری سازه کاهش می‌یابد، اوشندورف (Ochsendorf 2005) نشان می‌دهد که این تغییر تأثیر اندکی بر پاسخ دارد و در کار حرفه‌ای قابل صرف‌نظر کردن است و آشکار است در مدل آموزشی مقدماتی حاضر نیز قابل قبول می‌باشد. از سوی دیگر، کوچک کردن قطعات یادگیرندهٔ ناماهر را در چیدن و اجرای تمرین، دچار دشواری می‌کند.

در تصویر ۶، حالات مختلف قوس در تمرین دیده می‌شود. دانشجویان با تجربهٔ حسی خود درمی‌یابند که با افزایش نسبت ضخامت به دهانه و کاهش خیز قوس، تعادل آن راحت‌تر حاصل می‌شود. در تصویر ۷، هورتا (Huerta 2006) نشان می‌دهد که استادکاران با آجرچینی قوس در مجاورت شانه‌های قوس و کاهش خیز آن، می‌توانسته‌اند قوسی اقتصادی‌تر بسازند؛ زیرا به‌دلیل پایداری بهتر قوس‌های خفته، امکان ساخت آن‌ها با ضخامت کمتر وجود دارد. این

قسمت به‌سادگی نشان می‌دهد که احکام کلی رسوب‌یافته، مانند مزیت قوس‌های با خیز بلند، یعنی رانش کمتر، که مسئلهٔ خاص تاق‌های گوتیک بوده است، به همهٔ موارد قابل تسری نیستند. (در ادامه خواهیم دید که این مسئله در زلزله نیز خود را نشان می‌دهد.)



تصویر ۷: با کاهش خیز قوسِ تصویر چپ، از طریق ایجاد خاکریز یا امتداد آجرچینی دیوار تا شانهٔ قوس، می‌توان به طراحی اقتصادی‌تر (تصویر راست) دست یافت (Huerta 2006).

تصویر ۶: چیدن قوس با تناسبات مختلف. در سمت چپ، قوس با ضخامت کمتر و در سمت راست، قوس ضخیم‌تر چیده شده‌اند. و از بالا به پایین به‌تدریج، خیز قوس کاهش می‌یابد. قوس نیم‌دایرهٔ لاغر (بالا–چپ)، به‌دلیل ضعف در پایداری، با دست در جای خود نگاه داشته شده است! مدل‌سازی و عکس از دانشجو: محدثه رزانی، درس سیستم‌های ساختمانی، ۱۳۹۹.

٤. ١. ٢. بررسی رفتار مجموع قوس و پایه بر اساس جابه‌جایی ناشی از نشست

نشست یکی از مسائل مشهور در سازه‌های با مصالح بنایی است که در این قسمت، اثر آن بر روی سازه، مورد مطالعهٔ دانشجو قرار می‌گیرد. اهداف عملیاتی این مرحله عبارت‌اند از:

ـ مواجهه با سازه‌های با مصالح بنایی به‌عنوان یک کلیت؛ (و در صورت لزوم، جدا کردن بخشی از آن برای تحلیل)؛

ـ تغییر نگرش از «تحلیل با رویکرد مبتنی بر نیرو» به «تحلیل با رویکرد مبتنی بر جابه‌جایی»؛ (اصلاح روند غالب دربارهٔ فرض بار به‌عنوان عامل ناپایدارکنندهٔ سازهٔ بنایی تاریخی)؛

ـ و حرکت از تحلیل کشسان به‌سمت تکیه بر رفتار واقعی سازه یعنی امکان ترک‌خوردگی سازه بدون ناپایداری؛

در کتاب درسی *مبانی سازه‌ای معماری* (Sandaker et al. 2013)، به نکات کلیدی در طراحی قوس‌ها اشاره می‌شود؛ یکی از این نکات نحوهٔ فروآمدن قوس بر زمین می‌باشد که از نگاه نویسندگان کتاب یک *مسئله در تاریخ معماری* بوده است. هورتا (Huerta 2001) نیز اشاره می‌نماید که بیشتر تمهیدات استادکاران سنتی برای طراحی پایه بوده است. از سوی دیگر، اولین و حساس‌ترین حالت فروریختگی دیوارها در زلزله «حالت عمود بر صفحه» می‌باشد. و با این تذکرات و توجه به اینکه گری بلک و داف (Gary Black & Duff 1994) اشاره می‌کنند که برنامهٔ آموزش سازه در معماری باید عمیق و متمرکز (و نه گسترده و در سطح) باشد، مطالعهٔ رفتار سازه در «مقطع بنا» امری کلیدی است. (مشخص است که این مطالعه بر روی تاق آهنگ می‌باشد که رفتار آن قابل‌تقلیل به مقطع دوبعدی است.)

دانشجو در این مرحله، پایه‌ای با تناسبات مختلف، برای قوس‌های خود با بلوک‌های مکعب مستطیل شکل می‌سازد. تصویر۸ ابعاد ماکت را در یکی از حالات آزمایش نشان می‌دهد. سپس بلوک‌های پایه و قوس را بدون چسباننده، بر هم سوار می‌کند. در فرایند چیدن، زیر یکی از پایه‌ها، یک ابر یا جسم منعطف قرار داده و یک صفحه از فوم یا چوب روی این جسم منعطف قرار می‌دهد؛ سپس پایه را روی آن می‌گذارد. بعد از چیدن قوس، دانشجو به آهستگی، صفحهٔ زیر پایهٔ قوس را، بر روی اسفنج دوران می‌دهد به‌گونه‌ای که گویی ساختمان در آن نقطه نشست می‌کند (تصویر ۸). دانشجو

باید حرکت سازه را تا لحظهٔ فروریختن مشاهده و با دوربین ثبت و قاب‌های مراحل ترک‌خوردگی و نحوهٔ حرکت قوس و پایه را تا مرحلهٔ فروریختگی استخراج نماید.

دانشجو باید به پرسش‌های زیر پاسخ دهد:

ـ در فرایند جابه‌جایی پایه، سازه به چند قطعهٔ مجزایِ متشکل از بلوک‌ها تقسیم می‌شود؟

ـ کدام‌یک از قطعات بند قبلی، نقش پایدارکننده و کدام قطعات میل به فروریزش دارند؟

ـ سازه، در ابتدا چند ترک می‌خورد؟ محل ترک‌ها را روی تصویر آن مشخص نمایید.

ـ ترک در پایه چگونه است؟

تصویر ۸: نحوهٔ ایجاد نشست در پایه. مدل‌سازی، فیلم و عکس از دانشجو: فاطمه عرب‌پور، درس سیستم‌های ساختمانی، ۱۳۹۸

در اینجا دانشجو با نحوهٔ رفتار مجموعهٔ قوس و پایه در نشست مواجه می‌شود. در ابتدای پژوهش، از دانشجو خواسته می‌شد که رفتار قوس را به‌صورت انتزاعی، منفک از پایه، بر اساس حرکت پای آن بررسی نماید؛ اما به‌مرور آشکار شد که دانشجو منشأ این حرکت، یعنی نشست و بالتبع دوران پایه را تشخیص نداده و در اتصال رفتار قوس به رفتار پایه دچار مشکل می‌شود. ازاین‌رو در مدل نهایی، این مسئله تصحیح و سازه به‌صورت یکپارچه بررسی شد.

یکی از موارد مهم در این تمرین، اصلاح خطای شناختیِ تقسیم ناصحیح سازهٔ بنایی به اعضای سازه‌ای از پیش مفروض مانند قوس و پایه است که در فرایند چرخه‌ها آشکار شد. این تقسیم مرتبط با ساخت[۲۰] و نه سازه است: و باید نسبت به مفهومِ «پیوستگی» سازهٔ بنایی آگاهی ایجاد شود. (شاید این خطای شناختیِ مرسوم تحت‌تأثیر زبان خاص و شیوهٔ تحلیلِ سازه‌های جدید است که از اعضای منفرد چون تیر و ستون تشکیل شده‌اند!) مشاهدهٔ شکست مجموعه بیان می‌دارد که در حالت کلی، نقاط تسلیم سازه ارتباطی با شروع «نقطهٔ ساخت» قوس ندارد (تصویر ۸)؛ یعنی نمی‌توان سازه را به اعضای از پیش مفروض تقسیم نمود و یا مستقیماً مکان‌های هندسی حاصل از ساخت را نقاط اتصال سازه‌ای فرض نمود.

اصلاح خطای شناختیِ همگن فرض کردن مصالح سازهٔ بنایی، که در برخی دیدگاه‌های دانشگاهی در ایران رواج دارد، از دیگر نکات این تمرین است. این خطای شناختی ناشی از تطبیق اجباری سازه‌های با مصالح بنایی با تحلیل‌های مرسوم کشسان است. در این تمرین، دانشجو مشاهده می‌کند با کوچک‌ترین حرکت، سازه ترک می‌خورد و فرض‌های تحلیل کشسان مخدوش می‌شوند.

نحوهٔ رفتار سازهٔ بنایی به‌گونه‌ای است که پس از ترک خوردن، قطعات تشکیل‌شده بر اثر ترک‌ها که متشکل از تعدادی از بلوک‌ها هستند، در تعادل با یکدیگر قرار می‌گیرند (تصویر ۹). برخی از این قطعات نقش ناپایدارکننده (کار با علامت مثبت، حرکت نیروی وزن به‌سمت زمین) و برخی نقش پایدارکننده (کار با علامت منفی، حرکت نیروی وزن به‌سمت بالا) خواهند داشت (Clemente 1998). این امر، بنا را چون ترازویی در حال تعادل متصور می‌کند که در صورت چربیدن یکی از این کفه‌های ترازو، بنا به‌سمت پایداری یا ناپایداری حرکت می‌کند. این مشاهده، دروازهٔ ورود به فهم و تحلیل سینماتیک سازه‌های با مصالح بنایی و روش‌های قدرتمند تحلیلی این حوزه، مانند روش‌های کار و انرژی در سطوح بالاتر است (برای تحلیل در سطوح بالاتر نک: Clemente 1998؛ Ochsendorf 2005) (امکان پیوند مدل با سطوح بالاتر آموزشی). در ابتدای برنامه تلاش می‌شد از طریق مفهوم ریاضی کار، مسئله برای دانشجویان تبیین شود. اما عدم آمادگی برای درک مفاهیم پایه مانند کار سبب شد قسمت‌های ریاضی و تحلیلی حذف و به سطوح بالاتر منتقل شوند و یادگیرندهٔ مقدمات بر روی «مشاهده» متمرکز شود.

فهم ترک به‌عنوان نقطهٔ دوران یا مفصل مومسان (پلاستیک) و طرح مفهوم مفصل ناشی از تسلیم به‌عنوان موضوعی کلیدی در پایداری سازه از دیگر موارد نهفته در این تمرین است.

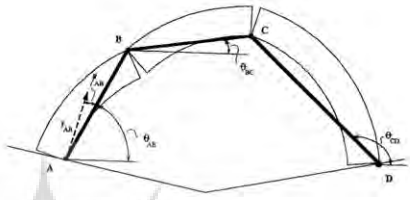
دانشجو باید به مشاهدهٔ محل ترک‌ها و تعداد آن‌ها بپردازد. از این طریق وی می‌آموزد که نخست: حداقل سه ترک به‌اضافهٔ حرکت دورانی پایه، برای حرکت بنا لازم است.[۲۱] و محل ترک‌ها نیز بسته به تناسبات قوس و پایه در محل‌های متفاوتی قرار می‌گیرند. در اولین چرخهٔ تدریس مشخص شد که به‌دلیل ظریف بودن برخی ترک‌ها، دانشجویان تشخیص درستی از تعداد ترک‌ها نداشتند. پس نیاز به مدل هندسی ـ فیزیکی دیگری برای تشخیص دقیق احساس شد و به برنامه

تصویر ۹: سازه به چهار قسمت تفکیک می‌شود. قطعات ۱ و ۴ نقش پایدارکننده و قطعات ۲ و ۳ نقش ناپایدارکننده دارند. مدل‌سازی، فیلم و عکس از دانشجو: فاطمه عرب‌پور، درس سیستم‌های ساختمانی، ۱۳۹۸

اضافه شد. (در ادامه بدان می‌پردازیم.)

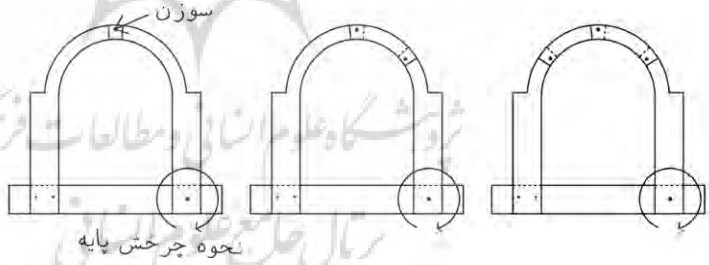
دانشجو درمی‌یابد که ترک پایه به‌صورت مورب اتفاق می‌افتد و بخشی از پایه از سیستم خارج می‌شود. در نتیجه، تمام ظرفیت پایه در فرایند پایدارسازی مجموعهٔ قوس و پایه شرکت نمی‌کند و پایه در میان رج‌های خود ترک می‌خورد. این مسئله توسط اوشندورف به‌صورت عددی تحلیل شده است (Ochsendorf 2005). (چنانچه خواهیم دید، در زلزله نیز این امر قابل مشاهده است.)

در گام بعدی دانشجو به آزمون تشخیص خود از تعداد ترک‌ها می‌پردازد. این روش استفاده از مدل‌های میله‌ای مکانیسم (مرسوم در مهندسی مکانیک) را نیز در سطوح بالاتر ملموس می‌نماید (تصویر ۱۰).

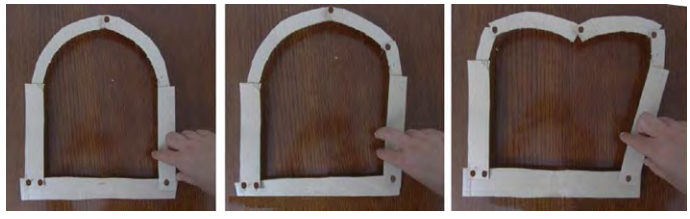


تصویر ۱۰: مکانیسم چهارمیله‌ای[۲۲] با چهار نقطهٔ دوران در تحلیل سازهٔ بنایی (Oppenheim 1996)

دانشجو مدلی از فوم مطابق ترسیم تصویر ۱۱ و ۱۲ می‌سازد. دو قطعهٔ مجاور فوم روی هم قرار داده شده و سوزنی عمود بر صفحهٔ گذرنده بر آن دو در محل اتصال فرومی‌رود تا دو قطعهٔ مجاور امکان دوران داشته باشند. پایه‌ای که نشست می‌کند نیز با یک سوزن به شاسی وصل می‌شود. پایهٔ دیگر با دو سوزن در جای خود ثابت می‌شود. سپس در مدل، مطابق شکل، به‌تدریج نقاط دوران را از یک تا سه افزایش داده و دانشجو به این سؤال پاسخ می‌دهد که سازه با چه تعداد نقطهٔ دوران امکان حرکت دارد (تصویر ۱۱).



تصویر ۱۱: با فرض چرخش یک پایه به‌دلیل نشست، دانشجو بررسی می‌کند که چند نقطهٔ دوران دیگر، غیر از نقطهٔ دوران پایه نیاز است تا سازه حرکت کند. پایهٔ سمت چپ، با دو سوزن ثابت شده است.



تصویر ۱۲: مدل‌های ساخته‌شده از فوم از سازه، با تعداد مفصل‌های متفاوت در قوس و یک نقطهٔ دوران ناشی از نشست در پایه. چپ: یک مفصل در قوس. وسط: دو مفصل در قوس. در این دو حالت، قطعات سازه نمی‌توانند حرکت کنند. راست: قطعات سازه، با وجود حداقل سه مفصل در قوس، به‌اضافهٔ نقطهٔ دوران پایه حرکت می‌کنند.

در این قسمت تمرین، دانشجو به مشاهدهٔ تعداد ترک‌های لازم از نظر هندسی برای حرکت سازه می‌پردازد؛ یعنی حداقل سه ترک به‌اضافهٔ دوران پایه. همان‌گونه که در قبل اشاره شد، برخی ترک‌ها در سازهٔ واقعی و مدل فیزیکی، به‌راحتی قابل مشاهده نیستند.

اگر دوران پایه (ناشی از نشست یا رانش قوس یا هر دو) متوقف شود، سیستم با سه ترک پایدار می‌ماند. اینجا زمان مناسبی برای طرح مسئلهٔ پایداری یک سیستم با سه نقطهٔ دوران است (امکان ارتباط دادن موضوع با مفهوم خرپا نیز وجود دارد). اضافه بر آن، فلسفهٔ طراحی سازه به‌صورت «ایجاد امکان تسلیم در سازه، بدون فروریزی» در این مرحله قابل طرح است.

بعد از بررسی تعداد ترک‌های لازم برای حرکت، گام بعدی تمرین توجه دادن به مطالعهٔ هندسهٔ حرکت بر روی مدل بلوک‌های صلب است. دانشجو در معرض پرسش‌های ذیل قرار می‌گیرد:

ـ در فرایند حرکت سازه، مکان ترک‌ها چه تغییری می‌کند؟

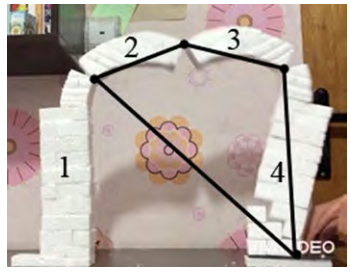
ـ در لحظهٔ فروریختن، محل، تعداد و آرایش هندسی ترک‌ها چگونه است؟ مدل میله‌ای آن را رسم نمایید.

ـ در ابتدای فرایند نشست، حرکت پای قوس (حرکت زیرترین بلوک قوس) چه مسیر هندسی دارد؟ (با تقریب بیان کنید.)

اهمیت این قسمت، تلاش برای جبران ضعف آموزش حالِ حاضرِ سازه در معماری یعنی نگاه ساکن و استاتیکی به سازه است. ماهیت پویای سازه‌های با مصالح بنایی، تغییرات و حرکات آن‌ها در طول زمان است که لزوم نگاه به سازه چون امری پویا (رویکرد دینامیکی) را تذکر می‌دهد. با مطالعهٔ لحظه‌به‌لحظهٔ حرکت، دانشجو متوجه جابه‌جا شدن ناگهانی ترک‌های قوس در برخی تناسبات سازه (وابسته به نسبت ضخامت قوس و پایه و زاویهٔ قطاع قوس) در آستانهٔ فروریختگی می‌شود. یافتن علت و نحوهٔ این جابه‌جایی نیاز به دانش بیشتری دارد، اما هدف در اینجا، ایجاد حساسیت نسبت به این موضوع است؛ زیرا به این امر اشاره دارد که تحلیل و طراحی منحصراً استاتیکی نمی‌تواند رفتار بنا را پیش‌بینی کند. دانشجو می‌آموزد که رویکرد باید مبتنی بر مطالعهٔ جابه‌جایی‌ها (سینماتیک) باشد. جابه‌جا شدن ترک‌ها در لحظهٔ فروریختگی در پایداری سازه نقش منفی دارد (Ochsendorf 2005) و در واقعیت نیز نمی‌توان از این اثر صرف‌نظر کرد. دانشجو بعد از بررسی دقیق تعداد ترک‌ها در قسمت قبل، ارتباط هندسی ترک‌ها را در آستانهٔ فروریختگی ثبت و مدل میله‌ای آن‌ها را ترسیم می‌کند (تصویر ۱۳). تشخیص هندسهٔ حرکت پای قوس، یعنی مسیر تقریباً خطی آن در افق، برای تحلیل و طراحی قوس‌های منفرد کاربرد دارد. و در این بستر، می‌توان مطالعهٔ رفتار قوس را بر اساس حرکت افقی پای آن طرح نمود. (پیش‌تر اشاره شد که آموزش رفتار قوس منفرد در حرکت پای آن، با خطاهای شناختی همراه شده بود.)

دانشجو باید با تغییر تناسبات پایه و هندسهٔ قوس، مسئله را بررسی و مقایسه نماید. بسته به تناسبات مختلف، مکانیسم‌های فروریختگی مختلفی ممکن هستند و ثبت حالات مختلف بر اساس مشاهده، مقدمه‌ای برای حرکت به‌سمت بررسی انواع این مکانیسم‌هاست. اما سنجش تناسبات مناسب برای بهبود رفتار در نشست، با این امکانات ممکن نیست؛ زیرا معمولاً مجموعهٔ قوس و پایه با چرخشی، تنها در حدود ۱ تا ۴ درجه فرومی‌ریزد (Ibid). و این موضوع با ابزار معمول قابل رصد نیست.

دو مکانیسم فروریختگی «قوس قوی ـ پایهٔ ضعیف» و «قوس ضعیف ـ پایهٔ قوی» مشهورترین حالات ممکن هستند (تصویر ۱۴ و ۱۵) (Ibid). با توجه به تناسب مرسوم سازه‌های سنتی، مکانیسم غالب و مرسوم فروریختگی «قوس ضعیف ـ پایهٔ قوی» است (تصویر ۱۵) که در این حالت، پس از فروریختن قوس و حذف رانش آن، پایهٔ دوران‌یافته به جای خود برمی‌گردد و احیا می‌شود. (به همین دلیل است که در بسیاری از بناهای تاریخی، پایه بر جای خود باقی مانده و سقف فرو ریخته است.)



تصویر ۱۳: ارتباط هندسی ترک‌ها و مدل میله‌ای. مدل‌سازی، فیلم و عکس از دانشجو: فاطمه عرب‌پور، درس سیستم‌های ساختمانی، ۱۳۹۸

تصویر ۱۴: فروریختگی در حالت قوس قوی ـ پایهٔ ضعیف: واژگونی پایه

تصویر ۱۵: فروریختگی در حالت قوس ضعیف ـ پایهٔ قوی. بعد از فروریختن قوس، پایه احیا می‌شود.

٤. ۱. ۳. بررسی رفتار در صفحهٔ مجموعهٔ قوس و پایه بر اساس حرکت افقی زمین در زلزله

هدف این قسمت آشنایی با رفتار در صفحهٔ مجموعهٔ قوس و پایه تحت اثر زلزله است. مسیر پیشنهادی برای دانشجو بدین شرح است که وی باید اثر حرکت رفت‌وبرگشتی و ضربهٔ جانبی زمین را بر مجموعهٔ قوس و پایه بررسی نماید. اثر زلزله‌های با فرکانس بالا و پایین به‌صورت کلی برای دانشجو طرح می‌شود، اما در ادامه، برنامه بر روی زلزله‌های با فرکانس پایین متمرکز می‌شود. مطالعهٔ حرکت رفت‌وبرگشتی برای طرح اجمالی واقعیت دینامیکی مسئله است، اما مطالعهٔ ضربه، به‌عنوان مقدمه‌ای برای طرح روش دوران صفحهٔ زمین می‌باشد که یک روش معادل استاتیکی است و می‌تواند امکان بررسی کمّی نتایج را در این برنامه فراهم کند. سپس دانشجو با روش دوران صفحهٔ زمین، مسئله را دقیق‌تر بررسی نماید. مبنای روش دوران صفحهٔ زمین نیز، در یک برنامهٔ جنبی توسط دانشجو مطالعه می‌شود. مشابه مرحلهٔ قبل، دانشجو بررسی نهایی را بر روی ترکیبات مختلف هندسهٔ قوس و پایه در یک تمرین گروهی یک‌ساعته[۲۳] پی می‌گیرد.

دانشجو قطعات قوس و پایه را بدون چسباننده بر هم سوار می‌کند و مجموعه را بر روی یک شاسی قرار می‌دهد. سپس، شاسی را موازی صفحه مجموعهٔ قوس و پایه به‌صورت رفت‌وبرگشت، با زمان تناوب کوتاه و بلند حرکت می‌دهد. و حرکت را شدت می‌بخشد تا در نهایت، سازه فروریزد (تصویر ۱۶ چپ). دانشجو حرکت سازه را تا لحظهٔ فروریختن مشاهده و با دوربین ثبت می‌کند و قاب‌های تصویرِ مراحل ترک‌خوردگی تا مرحلهٔ فروریختگی را استخراج می‌نماید.

مشخص است که مقدار شتاب لازم برای فروریختن، با این روش، قابل اندازه‌گیری نیست؛ اما برخی از مطالب بر روی این مدل قابل توضیح هستند. و در ادامه از روش دوران صفحهٔ زمین برای تعیین مقدار دقیق شتاب زلزله استفاده می‌شود (چنانچه امکانات بیشتری در محیط آموزشی باشد، امکان ساخت یک میز زلزلهٔ ارزان‌قیمت با دامنهٔ قابل تنظیم وجود دارد. برای مثال دی جونگ (De Jong 2009) برای رسالهٔ دکتری خود چنین امکانی را فراهم آورده است. اما در اینجا سعی شده است امکانات لازم برای انجام تمرین اندک باشد تا دانشجو بتواند در خانه یا خوابگاه خود نیز به انجام تمرین بپردازد).

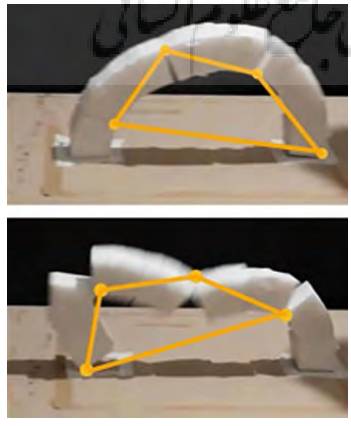
بسته به شرایط تحریک، سازه پاسخ‌های گوناگونی می‌دهد. نخست، مسیر را در تحریک با زمان تناوب بلند بررسی می‌کنیم. در این حالت، سازه با ایجاد تعداد ترک‌های کافی به مکانیسم تبدیل می‌شود و با گردش قطعات متشکل از بلوک‌ها نسبت به مفاصل فرومی‌ریزد (Ibid) (تقریباً شبیه حالت نشست) (تصویر ۱۶). در این مسیر، دانشجو مشاهده می‌نماید تا زمانی که دامنهٔ حرکت شاسی از آستانه‌ای فراتر نرود، سازه بدون ترک جابه‌جا می‌شود (نک:Oppenheim 1996; Clemente 1998) با رسیدن به این آستانه، سازه ترک می‌خورد (تصویر ۱۶). (تعداد ترک‌های لازم برای تبدیل سازه به مکانیسم در مبحث قبلی توسط دانشجو بررسی شد.) آستانهٔ مشخصی برای ایجاد مکانیسم فروریختگی وجود دارد.

تصویر ۱۶: مکانیسمی با چهار ترک (تقریباً مشابه نشست) ناشی از اثر زلزله. راست: ترک‌های ناشی از ضربه. چپ: ترک در آغاز ربع سیکل اول[۲۴] در حرکت رفت‌وبرگشتی. مدل‌سازی، فیلم و عکس از دانشجو: فاطمه عرب‌پور، درس سیستم‌های ساختمانی، ۱۳۹۸

چنانچه زمان تناوب حرکت کوتاه باشد، امکان لغزش قطعات بالا می‌رود (De Jong 2009) و شرط عدم لغزش مصالح هیمن مخدوش می‌شود که به محدودیت فرض‌های هیمن و مدل آموزشی حاضر دلالت می‌کند (تصویر ۱۷). بررسی این موضوع به تحلیل‌های پیچیده‌تری نیاز دارد و تنها برای شناخت محدودیت‌های مدل برای دانشجو طرح می‌شود. پژوهشگران مؤسسهٔ ایریس (۲۰۲۰) تأکید دارند که نوآموزان ممکن است رفتار مدل‌ها را قطعی تلقی کنند و حتماً باید دراین‌باره هشدار کافی دریافت کنند.

تصویر ۱۷: وقوع لغزش در زمان تناوب پایین در بلوک‌ها

مسیر آموزشی در حرکت با زمان تناوب بالا ادامه می‌یابد. در ادامه، دانشجو باید به این سؤال پاسخ دهد که در حرکت رفت‌وبرگشت چه اتفاقی برای ترک‌ها می‌افتد؟ تمرین این قسمت نشان می‌دهد که با هر رفت‌وبرگشت سازه و ضربهٔ ناشی از تغییر جهت، هندسهٔ حرکت قطعات سازه تغییر می‌کند و محل ترک‌ها جابه‌جا می‌شود. تصویر ۱۸ این رفتار را بر روی حرکت یک قوس نشان می‌دهد. (این قسمت به‌عنوان تذکری برای پیچیدگی رفتار دینامیکی و برای گشودن افقی بالاتر برای علاقه‌مندان است[۲۵] و می‌تواند خود به‌عنوان یک الگوی آموزشی کامل نیز بسط یابد.)



تصویر ۱۸: در حرکات متناوب رفت‌وبرگشتی، محل ترک‌های اولیه مرتب جابه‌جا می‌شود. مدل‌سازی، فیلم و عکس از دانشجو: فاطمه ضیایی، درس سیستم‌های ساختمانی، ۱۳۹۸

در گام بعد، از دانشجو خواسته می‌شود شاسی را به‌صورت ناگهانی به یک سمت حرکت دهد و رفتار آن را مطالعه نماید (تصویر ۱۶) (مطالعهٔ زلزله چون مجموعه‌ای از ضربه‌های متوالی مسئله‌ای آشنا در مهندسی زلزله است) و به‌تدریج شدت ضربه را افزایش دهد تا سازه فروریزد. تا میزان شدتی از ضربه، سازه بدون ترک باقی خواهد ماند. با افزایش شدت، سازه چهار ترک مشابه آغاز ربع سیکل اول حرکت رفت‌وبرگشتی خواهد داشت. در اینجا بسته به شدت ضربه، یا سازه فرو خواهد ریخت، یا بعد از رسیدن به نقطه‌ای احیا خواهد شد. اما می‌توان به‌صورت محافظه‌کارانه از این امتیاز، که وابسته به مشخصات زلزله است، صرف‌نظر کرد و فرض نمود با ایجاد چهار ترک سازه فرو خواهد ریخت. در حرکت رفت‌وبرگشتی، تفاوتی با رفتار ناشی از ضربه وجود دارد؛ ممکن است زلزله سازه را به یک مکانیسم تبدیل کند و آن را از حد مشخص برای بازگشت به تعادل اولیه نیز عبور دهد؛ اما حرکت بازگشتی این موضوع را جبران کند. اما این نکته نیز تابع مشخصات زلزله است و در نهایت، با توجه به این سیر، اگر فرض کنیم سازه در آستانهٔ تبدیل آن به مکانیسم فرو خواهد ریخت، تحلیلی محافظه‌کارانه و مناسب خواهیم داشت (Ochsendorf 2005 ;Clemente 1998).

سپس دانشجو باید به پرسش ذیل پاسخ دهد:

ـ در لحظهٔ فروریختن محل، تعداد و آرایش هندسی ترک‌ها چگونه است؟ تمرین را بر روی تناسبات هندسی دیگر سازه آزمون کنید.

هدف این قسمت بررسی تعداد و آرایش ترک‌ها برای فهم وابستگی پاسخ به تناسبات هندسی است (تصویر ۱۹). از سوی دیگر زمینه‌ای برای فهم بخش بعدی تمرین و مقایسهٔ این تجربه با روش دوران صفحهٔ زمین است.

تصویر ۱۹: بررسی تعداد و آرایش ترک‌ها برای فهم وابستگی پاسخ سازه به تناسبات هندسی آن. مشخصات هندسی مانند ارتفاع پایه، ضخامت قوس و نوع قوس، نیم‌دایره یا قطاع، در هر تصویر متفاوت هستند. برای مثال، در پایین‌ترین تصویر سمت چپ، سازه با وقوع سه ترک در قوس قطاع دایره و یک ترک در پایه به مکانیسم تبدیل شده است. در تصویر سمت راست آن، با تغییر هندسهٔ قوس، هر چهار ترک در قوس تشکیل شده‌اند. (در مواردی که دانشجو گوهٔ بزرگی را بر روی پایه قرار داده، اثرات وزن گوه باید لحاظ شود.) مدل‌سازی، فیلم و عکس: دانشجو: فاطمه عرب‌پور، درس سیستم‌های ساختمانی، ۱۳۹۸

فهم روش دوران صفحهٔ زمین از طریق یک مسیر یاریگر جنبی در برنامه انجام می‌شود.

٤. ١. ٣. ١. مسیر یاریگر: یافتن مقدار نیروی جانبی با استفاده از مدل فیزیکی و روش دوران صفحهٔ زمین

روش دوران صفحهٔ زمین یک روش معادل استاتیکی است که می‌تواند در تدقیق مطالعه یاریگر باشد. ازاین‌رو یک مسیر برای این روش طراحی شد که هدف‌های عملیاتی آن عبارت‌اند از:

ـ درک علت شبیه‌سازی اثر زلزله در تحلیل بلوک‌های صلب با روش دوران صفحهٔ زمین؛

ـ و ایجاد امکان اندازه‌گیری دقیق شتاب جانبی لازم برای تبدیل سازه به مکانیسم برای مقایسهٔ موارد تمرین،

این روش معتبر توسط کلمنته (Clemente 1998) برای تحلیل‌های پیشرفته به کار گرفته شده است. نتایج آزمایش نه‌تنها برای آموزش در سطح مقدمات کافی است، بلکه در کار حرفه‌ای قابل اجرا هستند. همان‌طور که اوشندورف ((Ochsendorf 2005 اشاره می‌نماید، اثر نیروی جانبی زلزله بر روی مدل بلوک‌های صلب، معادل دوران صفحهٔ زمین است؛ به‌طوری که ضریب زلزله برابر تانژانت زاویهٔ دوران است. این روش در برنامهٔ آموزشی آلن و همکاران (Allen and et al. 2010) برای تحلیل فونیکولار، مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ البته بدون آنکه علت آن برای دانشجویان توضیح داده شود. در چرخه‌های آموزشی، دریافتیم که گرچه این روش برای بررسی زلزله مناسب است، دانشجو علت و ارتباط آن را با زلزله درک نمی‌کند و آن را به‌صورت طوطی‌وار به کار می‌برد (به‌رغم توضیحات نظری در کلاس.) ازاین‌رو در مدل حاضر، علت این امر، به‌دلیل اهمیت آن در فهم رفتار و گسترش مبحث در آینده، توضیح داده می‌شود.

در مرحلهٔ اول، تأثیر زلزله بر مدل منعطف و صلب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از دانشجو موارد زیر خواسته می‌شود:

مدل ساده و سریع چندطبقه (حداقل ۳ طبقه) از دو سیستم بسیار سخت و منعطف بسازید (تصویر ۲۰). (برای مدل صلب می‌توانید از یک جعبه دستمال کاغذی استفاده نموده و با برداشتن یک سمت آن یک طبقهٔ میانی به آن اضافه نمایید و برای مدل منعطف می‌توانید سه کف را با کاموا به‌صورت آویخته آویزان کرده یا سیستم را با فنرهای شیرازه بسازید.)

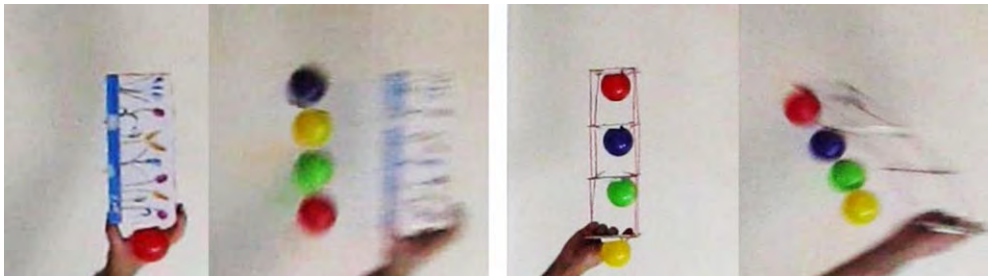
ـ سه گوی مشابه را در دو سیستم صلب و منعطف بر روی سه کف قرار دهید. برای ایستادن موقت گوی‌ها می‌توانید کمی چسب کاغذی به اطراف آن‌ها روی کف بچسبانید که گوی‌ها در ابتدا سر نخورند. محل اتصال به زمین را مانند حرکت زلزله به یک سمت حرکت دهید.

ـ کدام سیستم در حین جابه‌جایی تغییر شکل می‌دهد؟

ـ در دو سیستم منعطف و صلب گوی‌ها چگونه پرتاب می‌شوند؟

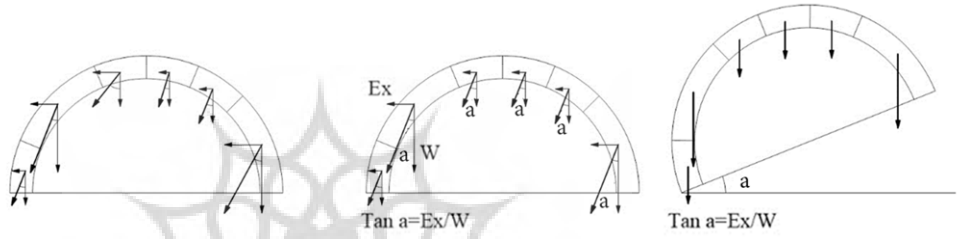
ـ میزان نیروی وارده به کف و گوی در دو سیستم چگونه است؟ نتیجه را گزارش نمایید.

دانشجو مشاهده می‌نماید که در حرکت جسم صلب، تمامی گوی‌ها شتاب یکسان و در حرکت سازهٔ منعطف، جرم‌ها شتاب متفاوت می‌گیرند.



تصویر ۲۰: در حرکت جسم صلب (چپ)، شتاب وارد بر تمامی نقاط سیستم یکسان است؛ اما در جرم منعطف، شتاب نقاط مختلف متفاوت‌اند (راست). (تصویرها به‌صورت معکوس قرار داده شده‌اند.)

در مرحلهٔ دوم، نسبت روش دوران صفحهٔ زمین با بخش قبلی بیان می‌شود. با فرض اینکه سازهٔ بنایی ما در آستانهٔ حرکت، مانند جسم صلب حرکت می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که تمامی بلوک‌ها شتاب جانبی یکسانی دریافت می‌کنند؛ یعنی نسبت نیروی جانبی به وزن آن‌ها یکسان است. این نسبت برابر تانژانت زاویهٔ میان بردار برایند نیروی جانبی و وزن قطعه و بردار وزن آن است (تصویر ۲۱ وسط). به زبان دیگر، تمام بردارهای برایند حاصل از وزن و نیروی جانبی موازی یکدیگر خواهند بود. ازاین‌رو می‌توان به‌جای اعمال نیروی جانبی، زمین را به‌اندازهٔ زاویهٔ ذکرشده دوران داد و تحت اثر نیروهای وزن بلوک‌ها (که آن‌ها نیز موازی هستند) بررسی نمود. مشخص است که در صورت دریافت شتاب متفاوت توسط بلوک‌ها، یعنی با فرض جسم منعطف، امکان استفاده از این روش نخواهد بود (تصویر ۲۱ چپ). (همچنین در این روش، تنش‌ها کمتر از حالت اعمال نیروی جانبی در واقعیت هستند، اما با توجه به فرض مقاومت فشاری مناسب این موضوع قابل اغماض است.)



تصویر ۲۱: ارتباط نسبت میزان نیروی جانبی وارده با تانژانت زاویهٔ دوران. امتداد بردارهای برایند در تصویر وسط، به‌دلیل شتاب برابر موازی می‌مانند. این معادل دوران قوس به‌اندازهٔ زاویهٔ بین نیروی وزن و بردار برایند (تصویر راست) است. تصویر چپ: شتاب‌های گوناگون منجر به بردارهای برایندی با امتداد متفاوت می‌شوند.

٤. ١. ٣. ٢. بررسی رفتار در صفحهٔ مجموعهٔ قوس و پایه بر اساس دوران صفحهٔ زمین

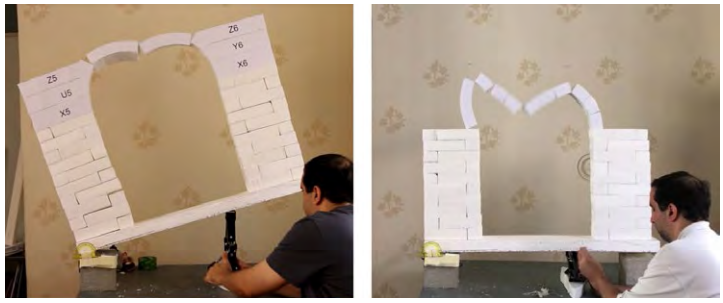
بعد از آشنایی دانشجو با روش دوران صفحهٔ زمین، امکان اندازه‌گیری دقیق نیروی جانبی لازم برای ایجاد مکانیسم وجود دارد.

از دانشجو خواسته می‌شود مجموعهٔ تاق و پایه را روی یک شاسی قرار دهد. سپس آهسته آهسته شاسی را دوران دهد تا سازه فروریزد (تصویر ۲۲). وی باید با استفاده از یک نقاله، زاویهٔ دوران شاسی را اندازه بگیرد و آرایش ترک‌ها را با حالت ضربه که قبلاً مشاهده کرده، مقایسه نماید (دقیق‌تر کردن آزمایش با استفاده از جک خودرو نیز امکان دارد.)

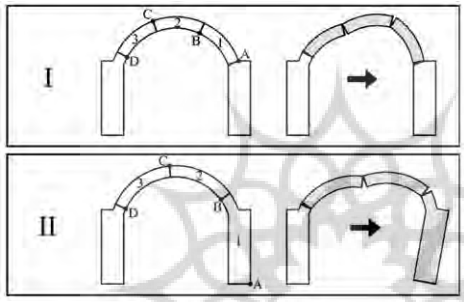
در این قسمت، دانشجو باید اثر ناشی از تغییر تناسبات هندسی قوس و پایه را در پایداری مجموعه در زلزله بررسی و گزارش نماید (تصویر ۲۲). دانشجو از طریق تغییر در مشخصات هندسی سازه تلاش می‌نماید رفتار مناسب‌تری در سازه ایجاد نماید و به آزمون پیش‌بینی خود می‌پردازد.

ممکن است بدون چرخش پایه، قوس با چهار مفصل فروریزد (قوس بسیار ضعیف). همچنین ممکن است مجموعه با سه مفصل در قوس و یک مفصل در پایه به مکانیسم تبدیل شود. در این حالت، یا پس از فروریختن قوس، پایه احیا می‌شود (اتفاق معمول: مکانیسم قوس ضعیف ـ پایه قوی) یا ممکن است پایه نیز فروریزد (قوس قوی ـ پایه ضعیف). دو مکانیسم فروریختگی اخیر در تصویر ۲۳ مشاهده می‌شوند.

در پایان، دانشجو باید گزارش نهایی از تجربهٔ خود را ارائه کند.



تصویر ۲۲: با ایجاد امکان اندازه‌گیری دقیق از طریق روش دوران صفحهٔ زمین، دانشجو باید به بررسی اثرات تناسب هندسی سازه بر روی میزان پایداری لرزه‌ای آن بپردازد. مقایسهٔ پایداری لرزه‌ای مجموعه در دو تناسب مختلف در اینجا مشاهده می‌شود: تغییر معنادار در پایداری لرزه‌ای سازه با تغییر مناسب در هندسه.



تصویر ۲۳: دو مکانیسم غالب فروریختگی (Alexakis and Makris 2017)

٤. ۲. چالش‌های باقی‌مانده پس از اتمام پژوهش

بعد از دریافت بازخورد هر چرخهٔ آموزشی تلاش شد تغییراتی به‌منظور بهبودی انجام شوند. اما بعد از آخرین تدریس مدل و اتمام زمان اقدام‌پژوهی مشکلاتی در مدل باقی ماند که نیاز است در فعالیت پژوهشی دیگری مورد بررسی قرار گیرند:

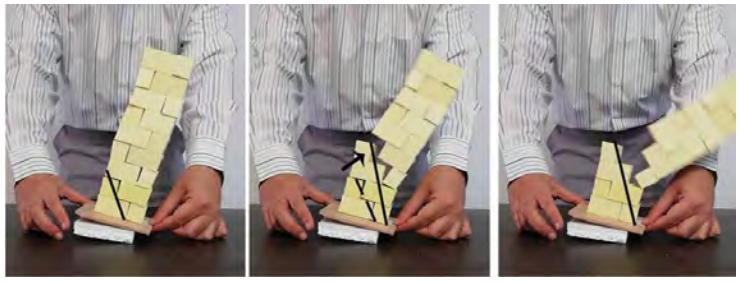
ـ حرکت‌ها و محل مفاصل بر روی مدلی با نقایص ساخت، با مدل نظری هندسی تفاوت دارند و گاه پیچیده‌تر است. گرچه این تغییرات بر روی پایداری کلی اثری ندارد، نشان می‌دهند تعیین دقیق مسیر نیروها و محل مفاصل مومسان به شرایط سازگاری سازه، مانند شیب احتمالی شاسی در آزمون نشست و عدم دقیق بودن ساخت مدل وابسته است (تصویر ۲۴). این مطلب باید برای دانشجو توضیح داده شود.

تصویر ۲۴: مسائل پیچیده‌تری چون محل متفاوت مفصل‌ها در مدل تجربی نسبت به مدل نظری (تصویر چپ) در رفتار قوس ظهور می‌نماید؛ درحالی‌که محل مفاصل در مدل تصویر وسط بر مدل نظری منطبق است، در مدل تصویر راست، محل مفصل‌ها تغییر کرده است.

ـ هندسهٔ ترک پایهٔ قوس در طول زمان تغییر می‌کند. این موضوع مهم و مؤثر در نوع مکانیسم فروریختگی است و می‌تواند به‌صورت تمرینی جداگانه مورد بررسی قرار گیرد و سپس، در تمرین اصلی لحاظ شود (تصویر ۲۵).

ـ قبل از دیدن بنا، تصور گردش پایه در نشست برای برخی از دانشجویان دشوار بود. شاید از طریق مشاهدهٔ بنای واقعی یا قرار دادن پایهٔ یک مدل ساختمانی بر روی مادهٔ ژلاتینی این فهم بهتر حاصل شود.

ـ عدم تشخیص تعداد ترک‌های لازم برای پایداری، حرکت و جابه‌جایی به‌عنوان مشکل برخی دانشجویان باقی ماند!



تصویر ۲۵: جابه‌جا شدن ترک در پایه مسئله‌ای مهم برای بررسی است.

ـ در برخی مدل‌های با قوس خفته، احتمال لغزش قوس بر بالای پایه قوت می‌گیرد: این موضوع برای تذکر محدودیت مدل مناسب است.

ـ انتقال منفی، بعد از تدریس نظری برخی مطالب، مشکل ایجاد می‌کرد؛ ازاین‌رو توصیه می‌شود محتوای نظری طرح‌شده در خلال متن، تنها در اختیار مدرس باشد و تمرکز دانشجو بر مشاهده باشد.

ـ دانشجویان در مسیر، تحلیل‌های کلیشه‌ای و ناصحیح مبتنی بر دانش انتزاعی و غیرانضمامی فیزیک دوران دبیرستان ارائه می‌دادند و تمرکز خود بر روی مشاهده را از دست می‌دادند.

ـ یکی از قسمت‌های دشوار پرهیز دادن دانشجویان از صدور احکام کلی بر اساس مشاهدهٔ یک حالت بود و این امر نشانگر آن است که تذکر مؤسسهٔ آموزشی ایریس (۲۰۲۰) شایان توجه بیشتری است.

ـ بی‌دقتی در مدل‌سازی و کار با ابزار، مانند برش نادقیق قطعات قوس، (مشهور به ضعف‌های حوزهٔ روانی و حرکتی در روان‌شناسی آموزش) در کار اختلال زیادی ایجاد می‌نماید. برخی دانشجویان نمی‌توانستند قوس نیم‌دایره را از نظر هندسی به تعداد قطاع‌های لازم تقسیم کنند. این امر نشان می‌دهد که تدریس استاتیک ترسیمی و روش کار مجازی در برنامهٔ مقدمات در شرایط فعلی، چقدر دور از دسترس است.

٤. ۳. امکان گسترش و عمق‌بخشی به تمرین

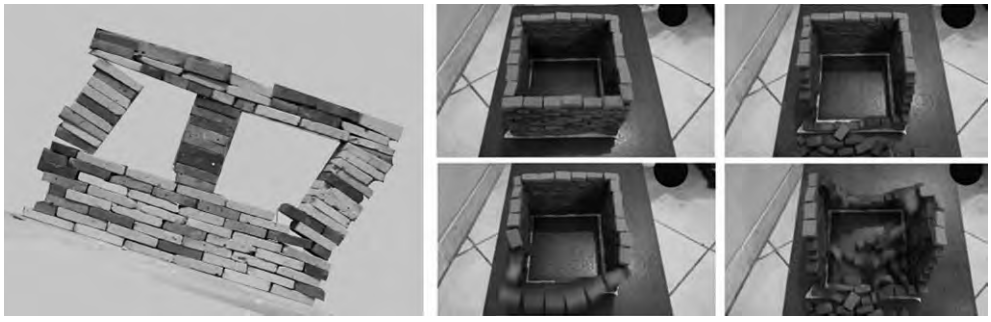
یکی از ویژگی‌های لازم برای آموزش در سطح مقدمات، امکان نهفته در آن برای حرکت به‌سمت سطوح بالاتر است. در خلال طراحی برنامه، همواره این مسئله مدنظر ما بود و امکان پیوند بین موارد طرح‌شده در سطح مقدمات و فعالیت‌های آموزش و پژوهشی در سطوح بالا سنجیده می‌شد.

در ذیل، بخشی از این امکان‌ها را معرفی می‌کنیم:

ـ «گسترش تمرین به پوشش‌های سه‌بعدی»؛ امکان بررسی پوشش‌های سه‌بعدی چون گنبد با این روش وجود دارد (تصویر ۲۶).

تصویر ۲۶: گسترش تمرین به بررسی رفتار پوشش‌های سه‌بعدی

ـ «گسترش تمرین به شکست دیوارهای ساختمانی و بررسی اثر بازشوها»؛ بعد از آشنایی با مدل بلوک‌های صلب، امکان بررسی فهم شکست عمود بر صفحه و در صفحهٔ دیوارها (اثر بازشوها) وجود دارد (تصویر ۲۷).



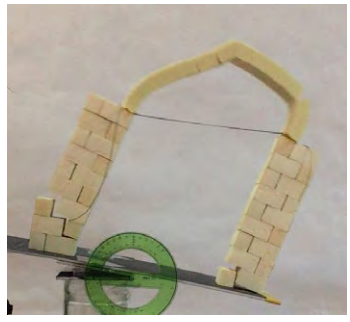
تصویر ۲۷: بررسی رفتار دیوارهای بنایی استفاده از روش دوران صفحهٔ زمین. راست: بررسی شکست عمود بر صفحه. چپ: بررسی اثر بازشوها. مدل‌سازی، فیلم و عکس از دانشجویان: نازنین نایب‌لی، فاطمه مکی و نگین شرفی، درس روستا، ۱۳۹۹.

ـ «بررسی اثر مداخلهٔ کششی در پایدارسازی سازه‌های تاقی»؛ امکان بررسی اثر مداخله با عناصر کششی در پایدارسازی سازه وجود دارد (تصویر ۲۸).

همچنین در ادامه می‌توان با طرح روش‌های استاتیک و دینامیک ترسیمی بر مبنای تجارب فیزیکی مقدماتی مدل، مسائل تحلیلی و طراحی را در سطح بالاتری طرح نمود:

ـ «تحلیل رفتار سازهٔ بنایی با استفاده از روش کار مجازی»؛ دانشجو می‌تواند در سطوح بالاتر، با بررسی نحوهٔ حرکت هندسی قطعات و آشنایی با مفهوم کار و مرکز لحظه‌ای دوران به تحلیل دقیق رفتار قوس بپردازد (اتصال به برنامهٔ تحلیل حدی دانشگاه تافتس).

ـ «طراحی قوس با فرم آزاد و پایدار در برابر زلزله»؛ بعد از آشنایی با مدل بلوک‌های صلب و تعادل نیروها، با تدریس منحنی زنجیره‌ای و استاتیک ترسیمی امکان طراحی سازه‌های فرم آزاد با مصالحی بنایی که در دوران بعد از مدرن مورد توجه قرار گرفته‌اند، وجود دارد (اتصال به برنامهٔ دانشگاه ام.ای.تی. و ای. تی. اچ؛ Allen and et al. 2010). طرحی شماتیک از یک قوس و فرایند پیشنهادی در تصویر ۲۹ ارائه شده است.



تصویر ۲۸: بررسی میزان اثر مداخلهٔ کششی با استفاده از روش دوران صفحهٔ زمین. مدل‌سازی، فیلم و عکس از: سروناز سرداری

تصویر ۲۹: مراحل طراحی یک قوس فرم آزاد با توان پایداری در برابر شتاب افقی معادل وزن خود. اثر دانشجویان: ام‌البنین شول و مینا موسایی‌پور، درس سیستم‌های ساختمانی، ۱۳۹۸

نتیجه

در این نوشتار، مدلی برای آموزش سازه‌های با مصالح بنایی در چهارچوب نظریهٔ مومسان و تحلیل و طراحی حدی معرفی شد. این مدل که حاصل اقدام‌پژوهی از طریق چرخه‌های آموزشی است، در جست‌وجوی روشی برای درک رفتار این سازه‌ها با حمایت یک نظریهٔ صحیح می‌باشد.

راهکار پیشنهادی در این نوشتار مطالعهٔ تجربی بر روی مدل بلوک‌های صلب و از طریق بررسی حرکت مدل‌ها بود. مفاهیمی چون پایداری، تسلیم، مفاصل مومسان و مکانیسم فروریختگی از طریق این مدل‌ها قابل طرح هستند. آزمون

با سعی و خطا بر روی مدل‌ها با تناسبات هندسی مختلف، به دانشجو، درکی از مکانیسم‌های محتمل فروریختگی در نشست و زلزله و وابستگی محل مفاصل مومسان به این تناسبات می‌دهد. مسائل مرتبط با نشست در این مدل‌ها قابل اندازه‌گیری دقیق نیستند، اما حد نهایی پایداری سازه در برابر زلزله، با استفاده از روش دوران زمین می‌تواند کمّی شود. در این حال، نتایج حاصل از مدل‌های بررسی‌شده، می‌توانند مورد مقایسه قرار گیرند و تغییر در مشخصات هندسی می‌تواند به‌عنوان راهکاری در طراحی دقیق مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، روش‌های مبتنی بر جابه‌جایی مقاله، به‌جای محوریت دادن به بارگذاری، توجه دانشجو را به جابه‌جایی به‌عنوان مسئلهٔ اساسی ناپایدارکنندهٔ بنا جلب می‌نماید. علاوه بر آن لزوم بررسی سینماتیک این سازه‌ها و توجه به تغییرات روی داده در آن‌ها در طول فرایند جابه‌جایی، دانشجویان را به ضعف نگاه منحصراً استاتیکی توجه می‌دهد. مدل آموزشی پیشنهادی مبتنی بر آزمایش و فیلم‌برداری از حرکت مدل‌ها توسط دانشجو و دنبال کردن پرسش‌های هدایت‌شدهٔ مدرس بود. با توجه به سطح دانشجویان و زمان برنامه، این پرسش‌ها بیشتر بر تجربه و مشاهده تأکید داشتند، زیرا آموزش انتزاعی و مبتنی بر ریاضی در دوره‌های پیش‌دانشگاهی امکان چنین تجاربی را برای یادگیرندگان فراهم نکرده است. آموزش تحلیل هندسی یا عددی، تنها پس از تجارب ملموس کافی و کار مدرس بر روی نحوهٔ اتصال این تجارب با مدل‌سازی ریاضی توصیه می‌شود. نمونه‌هایی که به‌عنوان نحوه‌های ممکن گسترش و ارتقای مدل ارائه شده‌اند، می‌توانند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرند. همچنین بررسی نحوهٔ تدریس ملموس روش‌های تحلیلی مانند روش کار مجازی و روش‌های انرژی می‌تواند پژوهشی مناسب در آینده باشد.

پی‌نوشت‌ها

1. Praxis
2. I-research
3. Hooke
4. M.I.T.
5. Tufts
6. Virtual Work Method

۷. وقوع ترک امکان تطبیق سازه‌های بنایی را که عموماً نامعین هستند، با تغییرات شرایط تکیه‌گاهی در طول زمان، فراهم می‌آورده است.

8. Equilibrium
9. Compatibility

۱۰. در تحلیل دقیق، اثر محدود بودن تنش فشاری با استفاده از مقطع مؤثر سازه به‌جای مقطع اسمی لحاظ می‌شود.
۱۱. البته میزان تغییر شکل نیز در آن‌ها نقش دارد.

12. Displacement-Based
13. Load-Based

۱۴. این قانون مشهور گالیله دربارهٔ مقیاس‌ناپذیری سازه‌هاست که آغاز حملهٔ دانش مهندسی سازه به‌معنای مدرن به روش استادکاران سنتی بوده است (Huerta 2006). این قانون نوعی سرآغاز علم مقاومت مصالح جدید محسوب می‌شود و طرح می‌نماید که در صورت حفظ تناسب اولیهٔ سازه، با افزایش مقیاس آن، افزایش تنش‌ها به‌صورت مخربی سازه را تحت‌تأثیر قرار خواهد داد.
۱۵. هیمن نشان می‌دهد برای آنکه دیوار کلیسای گوتیک با حفظ تناسب با افزایش مقیاس، زیر بار وزن خود خرد شود، باید ارتفاعی بیش از یک مایل داشته باشد (Heyman 1966): ازاین‌رو با وجود صحت نظری، قانون فوق، در حد تغییر مقیاس‌های مرسوم، به سازه‌های با مصالح بنایی نامرتبط است. برای توضیح بیشتر نک: مقالهٔ «گالیله در اشتباه بود» (Huerta 2006).
۱۶. مقصود مجموعه‌ای از بلوک‌های صلب است که فرم پایدار ایجاد می‌کند.

۱۷. در گام بعدی برنامه، با گسترش مدل به سه بعد، یعنی تاق آهنگ بر روی دو دیوار، رفتار سازه عمود بر صفحهٔ قوس نیز بررسی می‌شود که در مقالهٔ حاضر طرح نمی‌شود.

۱۸. تحلیلگر یا یادگیرنده می‌تواند با تغییر پارامترهای هندسی اثرگذار بر رفتار سازه، مانند ضخامت قوس و عرض پایه و جست‌وجوی مسیر نیرو با استاتیک ترسیمی تغییر در پاسخ سازه به مسائلی چون نشست یا زلزله را بررسی کند.

۱۹. برای شرح دقیق‌تر، نک: بیکر و هیمن ۱۳۹۱.

20. Construction

۲۱. برنامه در چهارچوب فرض‌های هیمن پیش می‌رود و بررسی لغزش احتمالی بین بلوک‌ها که سبب ایجاد مکانیسم با عضو لغزنده می‌شود، در چهارچوب برنامه نیست و قبلاً محدودهٔ پژوهش به دانشجو تذکر داده شده است.

22. Four-Bar Mechanism

۲۳. برپا کردن هر مدل حدود پنج دقیقه و انجام آزمایش، استخراج زاویه و رؤیت فیلم پانزده دقیقه زمان می‌برد. با این حساب، هر گروه دونفره می‌تواند ظرف ۲۰ دقیقه یک آزمون انجام دهد.

۲۴. سیکل حرکتی با آغاز حرکت زمین به یک سمت آغاز می‌شود و با طی یک ربع سیکل، زمین به بیشینهٔ جابه‌جایی خود می‌رسد و سپس، با طی یک ربع سیکل دیگر به نقطهٔ آغاز حرکت برمی‌گردد. سپس، حرکت در جهت مقابل آغاز می‌شود تا زمین با طی دو ربع سیکل دیگر به نقطهٔ اولیهٔ خود برگردد.

۲۵. البته باید توجه کرد که استفاده از مفهوم نیروی لازم برای تشکیل چهار مفصل، برای کار واقعی نیز مناسب می‌باشد، زیرا فرض فروریختگی به صرف ایجاد مکانیسم محافظه‌کارانه است.

منابع

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 بیکر، ج.، و ژ. هیمن. ۱۳۹۱. *طرح و تحلیل پلاستیک قاب‌ها*. جلد اول: اصول و مفاهیم. ترجمهٔ علی کاوه. تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران.

- Alexakis, Haris and Makris, Nicos. 2017. Hinging Mechanisms of Masonry Single-Nave Barre, *Journal of Structural Engineering*, 143 (6), 04017026.

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

- Gary Black, R. & Duff, S. 1994, A Model for Teaching Structures: Finite Element Analysis in Architectural Education, *Journal of Architectural Education*, pp. 38-55.

- Block, Philipe, 2022. https://block.arch.ethz.ch/brg/research/appropriate-construction-for-africa.

- 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*)27): 513-522.

- De Jong, M. J. 2009. Seismic Assessment Atrategies for Masonry Structures. Ph.D. thesis. Massachusetts institute of technology.

- Heyman, J. 2008, *Basic Structural Theory*, Cambridge: Cambridge University Press.

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

- Housner, George W. ,1963. The Behavior of Inverted Pendulum Structurs during Erthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*. VoL 53, No. 2, pp. 403-417. February, 1963.

- Huerta, S. 2006. Galileo Was Wrong: The Geometrical Design of Masonry Arches. *Nexus Network Journal* 8 (2): 25-51.
- Huerta, Santiago.2005.The Use of Simple Models in the Teaching of the Essentials of Masonry Arch , *International Seminar, Theory and Practice of Construction: Knowledege, Means, Models*.Ravenna 2005, 747-761.
- Huerta, S. 2001. Mechanics of Masonry Vaults: The Equilibrium Approach. *Historical Constructions*, P.B. Lourenço, and P. Roca (Eds.): 47-70.
- Neal B. Mitchell Jr. 1961. A Proposal for a Sequence of Structure Courses, *Journal of Architectural Education*, 15:4, 29-32, DOI: 10.1080/10464883.1961.11102442.
- Ochsendorf, J. 2005. Collapse of Masonry Structure. Ph.D. thesis. Cambridge University.
- Ochsendorf J. 2004. A Displacement-based Approach for the Safety Assessment of Masonry Structure. *Proceedings of the Forth Iinternational Seminar on Structural Analysis of Historical Construction*, Padova, Italy: 10-13.
- Oppenheim, I. J. 1996. Earthquake Analysis of Masonry Structure, *11th Conference on Earthquake Engineering*.
- Piggot-Irvine, E. 2002. Rhetoric and Practice in Action Research, *The Annual Conference of the British Educational Research Association*, University of Exeter, 12-14 September 2002 .
- Sandaker, Bjørn N., Arne P. Eggen, and Mark R. Cruvellier. 2013. *The Structural Basis of Architecture*. UK: Routledge.
- https://www.iris.edu/hq/inclass/lesson/555.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Behavior of Masonry Structures in Architectural Education Utilizing Rigid Blocks Models

Farzin Izad-panah
Ph. D. Candidate, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran
Faculty Member at Art and Architecture Saba, Shahid Bahonar University of Kerman

Eissa Hojjat
Professor, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran

Despite the challenges and significance of the field, the behavior of masonry structures has not been sufficiently addressed in structural education of architecture curricula. For this purpose, this paper reflects the results of a four-year action research in the praxis paradigm which was done through several educational cycles. This study concentrates on the education of masonry structures in the introductory levels of architecture curricula. It explores how the behavior of masonry structures can be instructed to architecture students and how to develop an education model. The study takes an experimental approach using the kinematic study of rigid block models in the framework of the theory of plasticity and limit state analysis. It considers the effects of settlement and earthquake as instability factors by a displacement-based approach. It was shown that some basic concepts and problems of limit state analysis such as yielding, creating plastic hinges, and the relation of the location of plastic hinges with the geometrical proportions of a structure could be taught by the kinematic study of rigid block models. The proposed educational model is based on students' experiments on physical models and the instructor's stage-by-stage queries with a focus on observation. As a result, the proposed education model can be utilized by instructors to improve education in this field.

Keywords:
masonry structures, structural behavior, structural education in architecture, rigid blocks model, limit state analysis

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی