

## بررسی پایداری لرزه‌ای قوس‌های آجری ایرانی

مجید پورامینیان<sup>۱</sup>، ارژنگ صادقی\*<sup>۲</sup> و سمیه پوربخشیان<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رامسر

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده فنی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

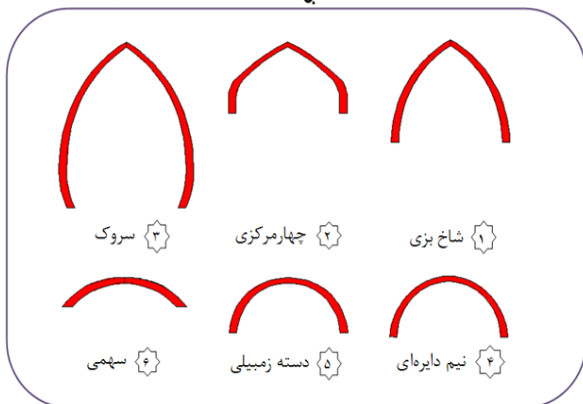
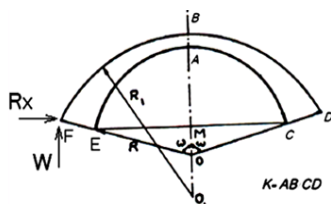
### چکیده

سابقه استفاده از فرم سازه‌ای قوس در ایران به هزاران سال می‌رسد. قوس از اجزای بنیادین در معماری ایران است. دیگر سیستم‌های سازه‌ای نظیر طاق و گنبد از قوس‌ها بدست آمده است. قوس‌ها، طاق‌ها و گنبد‌های مصالح بنایی توجه و حیرت بسیاری از محققان را در طول قرن‌ها برانگیخته و امروزه مطالعات ویژه‌ای در این زمینه در حال انجام است. این فرم‌ها در بناهای تاریخی و خطوط ریلی و جاده‌ای بسیاری از کشورهای دنیا قابل مشاهده است. در این تحقیق، پایداری انواع قوس‌های ایرانی تحت وزن، سربار و زلزله ارزیابی شده است. پرکاربردترین قوس‌های ایرانی پس از مدل‌سازی هندسی در نرم‌افزار AutoCAD، برای مدل‌سازی اجزای محدود به محیط نرم‌افزار ANSYS انتقال یافت. تحلیل استاتیکی، ارتعاش آزاد و دینامیکی خطی و غیرخطی بر روی مدل اجزای محدود انجام شده است. برای تحلیل دینامیکی از ۳ شتاب نگاشت تکان قوی استفاده شده است. پس از مقایسه نتایج تحلیل‌های گفته شده، مشخص شده است که قوس‌های سهمی باربری مناسبی نسبت به دیگر قوس‌ها دارند همچنین زمان و نحوه فروپاشی قوس‌ها و محل ترک‌های اولیه بدست آمده است.

**واژگان کلیدی:** پایداری لرزه‌ای، قوس‌های ایرانی، تحلیل دینامیکی، رفتار غیرخطی مصالح، ANSYS.

### ۱- مقدمه

طاق به صورت خطی در نظر گرفته شده است. قوس‌های بررسی شده در تحقیق شامل دایره‌ای، دسته زنبیلی، سهمی، چهار مرکزی، شاخ بزی (نیم بیضوی) و سروک است. مشخصات هندسی، ارتفاع و وزن قوس‌های نامبرده در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- شکل قوس‌های به کار رفته در تحقیق

قدیمی‌ترین چفد و قوس موجود ایران، مربوط به حدود ۲۰۰۰ سال قبل از میلاد است که در چغازنبیل بکار برده شده است. می‌توان گفت: "قوس‌ها خطوطی منحنی هستند که معمولاً دهانه آن‌ها بزرگ‌تر از خیز آن‌ها است" [۱]. به طور کلی آن‌ها را می‌توان به سه دسته کلی طبقه‌بندی نمود [۱]: قوس‌های مدور و مشابه آن، قوس‌های تیز (شاخ بزی) و قوس‌های تزیینی. تحقیقات زیادی در رابطه با پاسخ دینامیکی قوس‌های بنایی در سراسر دنیا صورت گرفته است.

Sinopoli در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش نیمه تحلیلی دینامیکی گام زمانی و Ochsendorf و Dejong در همین سال رفتار لرزه‌ای درون صفحه قوس سه بلوکی را بررسی نمودند همچنین تأثیر نوفه‌های تصادفی شتاب نگاشت در پاسخ دینامیکی قوس‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۲]. کیومرثی و همکاران در سال ۲۰۰۹ روی شکل بهینه قوس‌های آجری مصالح بنایی تحت بارگذاری دینامیکی تحقیقاتی انجام داده‌اند [۳]. مطابق شکل (۱) قسمت AB به تیزه یا کلید طاق موسوم است. پایین‌ترین قسمت طاق یعنی CD و EF موسوم به طاق است و نسبت طاق‌ها به تیزه حداقل یک است. اختلاف ارتفاع بین تیزه و طاق، خیز طاق و دهانه قوس است. در این تحقیق، دهانه بکار رفته در تمامی قوس‌ها ۸ متر،  $CD = ۶۰\text{ cm}$  و  $۴۰\text{ cm}$   $AB =$  در نظر گرفته شده است. افزایش ضخامت از کلید طاق تا

جدول ۱- مشخصات قوس‌های بکار رفته در تحقیق

نوع قوس	خیز (متر) AM	نسبت خیز به دهانه AM/EC	وزن (KN)	شعاع‌های داخلی قوس (m)
شاخ بزی	۶/۹۰	۰/۸۶	۶۱/۵۸	$R_1=8$
چهار مرکزی	۳/۷	۰/۴۶	۴۵/۷۰	$R_1=2, R_2=10.40$
سروک	۱۱/۹۰	۱/۴۹	۹۶/۳۹	$R_1=5077, R_2=9.55$
نیم دایره‌ای	۴	۰/۵	۴۲/۰۷	$R_1=4$
دسته زمبیلی	۳/۵۰	۰/۴۳	۴۳/۹۰	$R_1=3.78, R_2=4$
سهمی	۲/۰۶	۰/۲۶	۳۷/۱۶	$R_1=5.70$

جدول ۲- معیارهای بکار رفته در مدلسازی اجزای محدود [۵،۶]

مشخصات فیزیکی مصالح بنایی	ضرایب استفاده شده در معیار گسیختگی ویلام وارنکه	ضرایب استفاده شده در معیار درآگر پراگر
$E=7 \times 10^9 Pa$	$\beta_t = 0.1$	$C=100000 Pa$
$f_t=2 \times 10^5 Pa$	$\beta_c = 0.9$	$\varphi = 20^\circ$
$\rho=1850 kg/m^3$	$\sigma = 0.2 Mpa$	$\eta = 15^\circ$
$\nu = 0.2$ $\varepsilon = 0.002$	$\sigma = 2.5 Mpa$	---

## ۲- تحلیل استاتیکی تحت وزن قوس و سربار

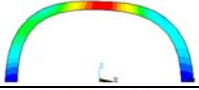
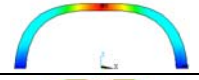
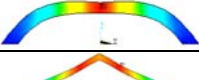



معمولاً یک بنای آجری در ابتدا تحت وزن خود و سپس در حالت تغییر شکل یافته تحت نیروهای دیگر تحلیل می‌شود تا توزیع مجدد و پیچیده تنش‌ها که ناشی از ساخت بنا و در نتیجه شکل‌گیری ترک است، در نظر گرفته شود. با اعمال کنش‌های بیشتر (باد، زمین لرزه، ...) بر روی سازه نهایی، امکان ارزیابی حاشیه واقعی ایمنی به وجود می‌آید که بسیار متفاوت از موردی است که با اعمال همان کنش‌ها بر روی هندسه اولیه بدست می‌آید. در این مقاله مدل اجزای محدود قوس‌ها با استفاده از المان ۸ گرهی Solid 45 ایجاد شده و قوس در پاتاق به صورت گیردار مدل شده است. برای المان‌ها رفتار الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. محیط مصالح بنایی در این مدل ایزوتروپ همگن در نظر گرفته شده و پارامترهای مذکور در ستون سمت چپ جدول (۲) آورده شده‌اند. اغلب قوس‌ها به عنوان المان‌های باربر در سازه بکار می‌روند و باید علاوه بر وزنش، سربار وارده را نیز تحمل نماید. در حقیقت قوس‌ها نقش شاه‌تیر را در سازه‌های امروزی ایفا می‌نمایند. سهم قوس از سربار ثقلی وارد به قوس ۶۰ کیلو نیوتن در نظر گرفته شده است. این مقدار با فرض این که عرض بارگیری قوس، ۶ الی ۱۰ برابر عرض قوس باشد، بدست آمده است و کمی دست پایین انتخاب شده است. علت این است که بر خلاف سازه‌های مدرن، در سازه‌های بنایی و تاریخی بار ثقلی باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی می‌شود [۴]. این بار با توجه به هندسه قوس، بر واحد طول قوس و به صورت ثقلی اعمال شده است. در جدول (۳) نتایج تحلیل استاتیکی و مقادیر ماکزیم تنش‌های کششی و فشاری ایجاد شده در هر یک از قوس‌ها نشان داده شده است. فرم تغییر شکل‌های ماکزیم نیز در جدول (۳) مشاهده می‌شوند که در قوس‌های تیزه‌دار، خیز ماکزیم در محلی پایین‌تر از تیزه رخ می‌دهد و برای دیگر قوس‌ها بر روی محور تقارن قوس می‌باشد. تنش‌های مجاز در جدول (۲) نشان داده شده است.

تغییر شکل قوس‌ها، جز در قوس سروک، در حد مقادیر مجاز است (کرنش مجاز مصالح بنایی،  $\varepsilon_c = 0.002$  در نظر گرفته شده است). برای قوس سروک مقادیر تنش‌ها فراتر از تنش‌های مجاز مصالح می‌باشد، لذا این نوع قوس با ضخامت فرض شده، برای سربار مقاومت ندارد و بالتبع در برابر بارگذاری لرزه‌ای نیز ناپایدار است.

در ۵ قوس دیگر مقاومت فشاری موجود کمتر از مقادیر مجاز است ولی تنش کششی قوس دایره‌ای و چهار مرکزی بیشتر از مقادیر مجاز آن است، لذا در مناطقی با تنش کششی فراتر از مقادیر مجاز، ترک خوردگی مصالح اتفاق خواهد افتاد. برای قوس سهمی و شاخ بزی تمامی نتایج خیز ماکزیم، تنش کششی و فشاری ماکزیم مقادیر نسبتاً پایینی دارند و احتمال ترک خوردگی و پکیدگی کم است، بنابراین قوس شاخ بزی و سهمی باربری ثقلی مناسبی دارند و چهار مرکزی و سروک نامناسب هستند. انتقال نیرو در کلیه مقطع قوس سهمی، بویژه در پاتاق، عمده‌تاً بصورت فشاری می‌باشد و تنش‌های کششی قابل اغماض می‌باشند. باتوجه به جدول (۳)، می‌توان پایداری قوس‌ها را تحت بارگذاری ثقلی از زیاد به کم به ترتیب زیر بیان نمود: قوس شاخ بزی، سهمی، دسته زمبیلی، دایره‌ای، چهارمرکزی و سروک.

به طور کلی تحت بارهای ثقلی، افزایش خیز قوس موجب افزایش مؤلفه قائم نیروی پاتاق و کاهش نیروی رانش افقی می‌شود که مقادیر این نیروها در در جدول (۴) ارائه شده‌اند. از مقدار F نشان داده شده در جدول (۴) می‌توان مقدار و زاویه برآیند نیروهای وارده به هر پای طاق را بدست آورد. تفسیر مقدار F برای قوس سهمی ( $F=1.04$ ) نشان دهنده این مطلب است که زاویه‌ی نیروی برآیند پاتاق (در تحقیق حاضر زاویه پاتاق با محور افق برابر ۴۶ درجه)، موازی خط مماس بر قوس در پاتاق است که باعث می‌شود تنش‌های کششی و فشاری در این ناحیه بحرانی به صورت یکنواخت باشد و ظرفیت باربری مقطع به طور بهینه استفاده می‌شود.

جدول ۳- نتایج تحلیل تحت وزن و سربار (ثقلی) قوس

نوع قوس	حداکثر تغییر شکل (mm)	تغییر شکل قوس	موقعیت و مقدار تنش ماکزیمم (مگاپاسکال)	
			کششی	فشاری
دایره‌ای	۰/۶۹		۰/۲۶ وجه داخلی و انتهای گیردار قوس	۰/۶۴ وجه خارجی انتهای گیردار
دسته زنبیلی	۰/۶۷		۰/۱۹ وجه داخلی وسط قوس	۰/۵۳ وجه خارجی انتهای گیردار
سهمی	۰/۵۵		۰/۰۹ وجه داخلی و انتهای گیردار قوس	۰/۵۴ وجه خارجی وسط قوس
چهار مرکزی	۰/۶		۰/۳۴ وجه داخلی و انتهای گیردار قوس	۰/۶۹ وجه خارجی و انتهای گیردار قوس
شاخ بزی	۰/۳۴		۰/۰۷ وجه خارجی تیزه	۰/۴۷ وجه خارجی و انتهای گیردار قوس
سروک	۵/۴		۵/۵ وجه داخلی انتهای گیردار	۲۰ وجه خارجی تیزه

جدول ۴- نتایج تحلیل قوس‌ها تحت وزن و سربار (ثقلی)

نوع قوس	دایره‌ای	دسته زنبیلی	سهمی	چهار مرکزی	شاخ بزی	سروک
خیز (متر)	۴	۳/۵۰	۲/۰۶	۳/۷۰	۶/۹۰	۱۱/۹۰
نیروی رانش در پلاط قوس Rx (KN)	۱۸/۶	۲۲/۱	۴۴/۵	۱۸/۵	۱۳/۱	۹/۹۸
نیروی قائم در پلاط قوس W	۴۷/۸	۴۶/۳	۴۲/۴۷	۴۷/۱	۵۵/۵	۷۲/۶
$F=R_x / W$	۰/۳۹	۰/۴۸	۱/۰۴	۰/۳۹	۰/۲۴	۰/۱۴


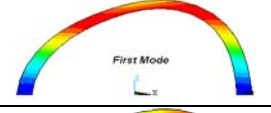
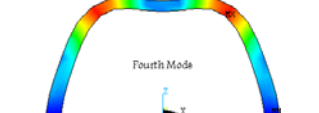
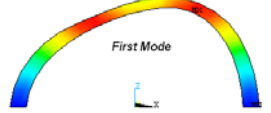
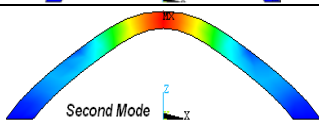
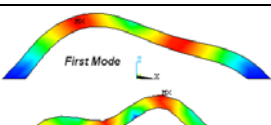
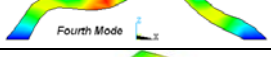
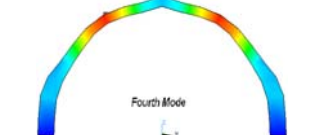
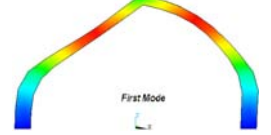
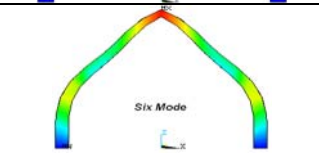
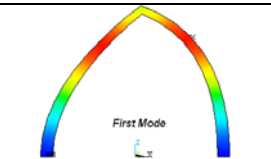
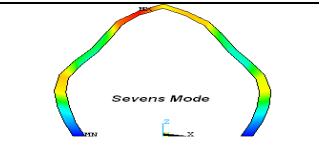

## ۳- تحلیل ارتعاش آزاد

با استفاده از تحلیل مودال در جهت محورهای اصلی X و Z موده‌های اصلی جداگانه بدست آمد که در جدول (۵)، شکل، پیرو موده‌ها نشان داده شده است. مقدار ضریب میرایی ۰/۰۷ در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب میرایی در سازه‌های بنایی غیرمسلح بیشتر از سازه‌های مدرن است. دلیل آن نیز، وجود ترک‌های ریز فراوان در این گونه بناهاست [۵]. مبنای انتخاب موده‌های اصلی، بالاترین ضریب مشارکت جرم مودی می‌باشد. و در مودهایی که این ضرایب به هم نزدیکند، تمامی موده‌های با ضریب مشارکت جرم مودی بالا در نظر گرفته شده‌اند. از مقایسه زمان تناوب اصلی قوس‌های مختلف جدول (۵)، مشخص می‌شود که برای قوس‌های با نسبت ارتفاع به دهانه یکسان، این مقدار برای قوس‌های تیزه‌دار بیشتر از قوس‌های دایره‌ای و بیضی است. همچنین زمان تناوب زیاد قوس سروک بیانگر سختی جانبی کم و جرم زیاد آن است. از میان قوس‌های مختلف بیشترین و کمترین زمان تناوب به ترتیب مربوط به قوس سروک و سهمی شکل است که بیانگر میزان سختی زیاد قوس سهمی است.

## ۴- تحلیل دینامیکی خطی

برای درک کلی رفتار دینامیکی قوس‌ها، ابتدا تحلیل خطی مورد استفاده قرار گرفت. خواص مکانیکی مصالح، همان خواص خطی مصالح بکار رفته در تحلیل استاتیکی است. در جدول (۶) ویژگی شتاب نگاشت‌های استفاده شده در تحقیق نشان داده شده است. این شتاب نگاشت‌ها مؤلفه افقی هستند. از میان شتاب نگاشت زلزله‌های قوی موجود، شتاب‌نگاشت‌های مناسب ایران انتخاب شد. عواملی که در انتخاب شتاب نگاشت‌ها لحاظ گردید شامل: انتخاب شتاب نگاشت زلزله‌های قوی کشور ایران، و شتاب نگاشت زلزله‌های تکان قوی جهان می‌باشد. با توجه به گستره زمان تناوب اصلی تمامی قوس‌ها بیشترین پاسخ از میان طیف پاسخ زلزله‌های ذکر شده به شتاب نگاشت زلزله کوبه اختصاص یافت. بنابراین فقط پاسخ مربوط به نتایج آن در این جا آورده شده است. در انتهای تحقیق، در جدول (۱۱)، به عنوان نمونه پاسخ قوس دایره‌ای، تحت بارگذاری شتاب نگاشت طیس (شتاب نگاشت غیر مؤثر)، نشان داده شده است که به دلیل کمبود فضا به ارائه نتایج یک قوس به پاسخ یک شتاب نگاشت غیرمؤثر بسنده شده است.

جدول ۵- نتایج تحلیل مودال و شکل مدهای غالب

شکل مود غالب عمودی	شکل مود غالب افقی	نوع قوس	پریود (ثانیه) $T_{DIR}$
		دایره‌ای	$T_{x1}=0.083$
			$T_{z4}=0.016$
		دسته زنبیلی	$T_{x1}=0.073$
			$T_{z4}=0.015$
		سه‌می	$T_{x1}=0.035$
			$T_{x4}=0.011$
			$T_{z2}=0.026$
		چهار مرکزی	$T_{x1}=0.089$
			$T_{z4}=0.027$
		شاخ بزی	$T_{x1}=0.147$
			$T_{z6}=0.015$
		سروک	$T_{x1}=0.407$

آن کمتر از مقادیر مجاز آن می‌باشد که در جدول (۷) نشان داده شده است. در قوس سه‌می ظرفیت باربری مقطع به‌طور بهینه استفاده می‌شود که قبلاً نیز به آن اشاره گردید. در مرحله تحلیل دینامیکی، به‌علت عملکرد ضعیف در تحلیل‌های استاتیکی، قوس سروک کنار گذاشته شد. از بررسی نتایج بدست آمده از تحلیل قوس‌ها مشاهده می‌شود که تنش‌های بیشینه در محل تکیه‌گاه‌های گیردار ایجاد می‌شوند. این کار علی‌رغم این است که قوس‌ها دارای مقطع و اینرسی بزرگ‌تر می‌باشند. در جدول (۸) تاریخچه تغییر مکان، تنش کششی اصلی و تنش فشاری اصلی در محل‌های بحرانی نشان داده شده است. از جدول (۳) و (۸) مشاهده می‌شود که تغییر مکان ماکزیمم قوس سه‌می تحت بار ثقلی تقریباً ۸ برابر تغییر مکان آن تحت بار زلزله کوبه است که این مطلب بیانگر سختی بالای قوس در جهت محور افقی است.

##### ۵- تحلیل دینامیکی غیرخطی (ماکرو مدل پخشی)

تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی روشی دقیق جهت تعیین لحظه به لحظه پاسخ سازه در برابر شتاب زلزله اعمالی به تکیه‌گاه‌های آن است مشروط بر اینکه رفتار تعریف شده شامل هر دو حوزه خطی و غیرخطی باشد.

جدول ۶- ویژگی شتاب نگاشت‌های بکار رفته در تحقیق

ارائه نتایج	PGA (g)	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	محل زلزله (زمان تداوم)
متن تحقیق	۰/۸۳۴	۸۱۸	کوبه (۳۰ ثانیه)
جدول (۱۱)	۰/۸۳۲	۸۱۶	طیس (۳۰ ثانیه)
جدول (۱۱)	۰/۵۱۴	۵۰۴	منجیل (۳۰ ثانیه)

همانطور که در جداول (۸) تا (۱۱) مشاهده می‌شود پاسخ‌های نظیر تحت بارگذاری شتاب نگاشت کوبه برای نقاط نظیر قوس پاسخ‌های بیشتری دارد. نتایج تنش‌های ماکزیمم و موقعیت مکانی آنها در جدول (۷) ارائه شده‌اند. نسبت رانش پاتاق به عکس‌العمل قائم پاتاق پارامتر مهمی در تحلیل سازه قوس‌ها می‌باشد. با بررسی نتایج جدول (۴) و (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع در قوس، مقدار نیروی افقی کم می‌شود و قوس در مقابل بارگذاری ثقلی پایدارتر و سنگین‌تر می‌شود. به جز قوس سروک که تاب بارگذاری ثقلی را نیاورده است، دیگر قوس‌ها دارای تنش‌های فشاری کمتر از مقادیر مجازند و در رابطه با تنش‌های کششی فقط در قوس سه‌می، مقادیر تنش کمتر از مقادیر مجاز هستند. باربری جانبی قوس سه‌می بسیار مناسب است و تنش‌های کششی و فشاری موجود

جدول ۷- تحلیل دینامیکی خطی تحت شتاب نگاشت افقی زلزله کوبه

نوع قوس	Rx(KN)	W(KN)	Rx/W	مقدار و موقعیت تنش کششی ماکزیمم (MPa)	مقدار و موقعیت تنش فشاری ماکزیمم
دایره‌ای	۲۰/۰۵	۴۸/۱۵۶	۰/۴۱	۱ وجه داخلی و انتهای گیردار قوس	۱/۳۵ وجه بیرونی و انتهای گیردار قوس
دسته زنبیلی	۲۲/۰۸	۴۶/۳	۰/۴۸	۰/۸۵ وجه داخلی و انتهای گیردار قوس (۶/۶ ثانیه)	۱/۱۸ وجه بیرونی و انتهای گیردار قوس
سهمی	۴۴/۵۱	۴۲/۴۷	۱/۰۵	۰/۱۳۷ وجه داخلی انتهای گیردار قوس ۶/۶ ثانیه	۰/۵۹ وجه داخلی انتهای گیردار
چهار مرکزی	۱۷/۸۶	۴۶/۵۴	۰/۳۸	۱/۱۸ وجه داخلی و انتهای گیردار قوس	۱/۵۷ وجه بیرونی و انتهای گیردار قوس
شاخ بزی	۱۳/۱	۵۵/۵	۰/۲۴	۱/۴۶ وجه داخلی و انتهای گیردار قوس (۶/۶ ثانیه)	۱/۹۵ وجه بیرونی و انتهای گیردار قوس

در چنین تحلیلی پاسخ سازه تابعی از زمان است. اگر در تعریف مشخصات مصالح سازه معیارهای گسیختگی معرفی گردند و مقادیر موجود تنش یا کرنش آن، از مقادیر مجاز آن افزون گردند، گسیختگی اتفاق می‌افتد. در این وضعیت ماهیت پارامتر مستقل زمان از اهمیت بیشتری، نسبت به حالتی که نسبت تنش موجود به مجاز کوچک‌تر از یک باشد، برخوردار است. زمان خرابی قوس‌ها در تحلیل دینامیکی غیرخطی در جدول (۹) نشان داده شده است. دهانه تمامی قوس‌ها ۸ متر است. برای تحلیل غیرخطی دینامیکی، قوس‌ها با استفاده از

المان سه بعدی Solid 65 مدل‌سازی شده‌اند. با توجه به قابلیت موجود در این المان، معیارهای شکست مصالح بنایی توسط دو پارامتر مقاومت کششی محوری  $f_t$  و مقاومت فشاری محوری  $f_c$  مدل‌سازی شده است. در تحلیل‌های موجود، قوس‌ها در حوزه غیرخطی نیز الاستیک در نظر گرفته شده‌اند. مدل ترک‌هایی که این المان در نظر می‌گیرد، مدل مورد استفاده در مثن‌بندی قوس‌ها یعنی ماکرومدل پخش شده و معیار شکست (پکیدگی و ترک خوردگی) مورد استفاده، معیار شکست پارامتری ویلیام وارنکه (William-Warnke) است.

جدول ۸- نتایج تحلیل دینامیکی خطی تحت شتاب نگاشت افقی زلزله کوبه

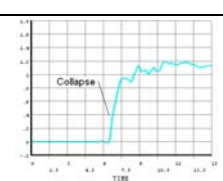
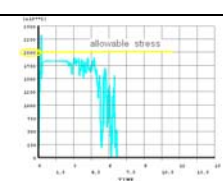
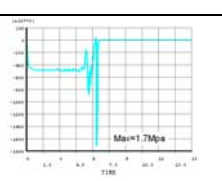
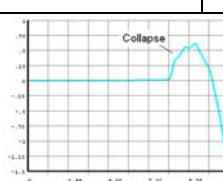
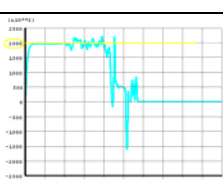

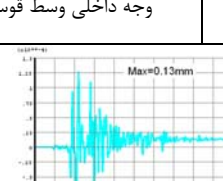
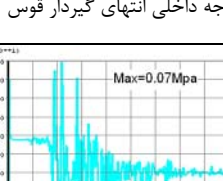
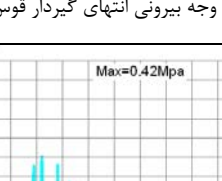

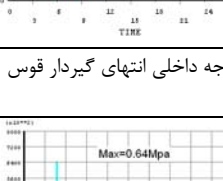
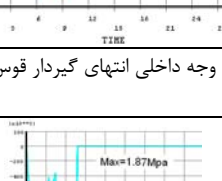
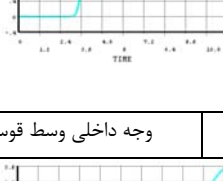


انواع قوس	تاریخچه تغییر مکان افقی (میلیمتر)	تاریخچه تنش کششی ماکزیمم (مگاپاسکال)	تاریخچه تنش فشاری ماکزیمم (مگاپاسکال)
دایره‌ای			
	مکان: وجه داخلی وسط قوس	وجه داخلی انتهای گیردار قوس	وجه بیرونی انتهای گیردار قوس
دسته زنبیلی			
	مکان: وجه داخلی وسط قوس	وجه داخلی انتهای گیردار قوس	وجه بیرونی انتهای گیردار قوس
سهمی			
	مکان: وجه داخلی وسط قوس	وجه داخلی انتهای گیردار قوس	وجه داخلی انتهای گیردار قوس
چهار مرکزی			
	مکان: وجه داخلی وسط قوس	وجه داخلی انتهای گیردار قوس	وجه بیرونی انتهای گیردار قوس
شاخ بزی (بیم بیضوی)			
	مکان: وجه داخلی وسط قوس	وجه داخلی انتهای گیردار قوس	وجه بیرونی انتهای گیردار قوس

جدول ۹- نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت شتاب نگاشت زلزله کوبه

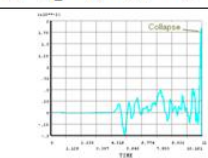
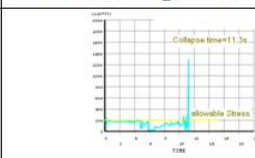
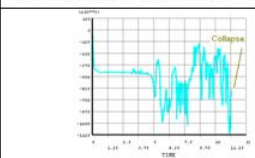
نوع قوس	دایره‌ای	دسته زنبیلی	چهار مرکزی	شاخ بزی
زمان خرابی قوس	۵/۸	۸/۵	۶/۶۲	۶/۲۲
موقعیت ترک اولیه	وجه داخلی وسط قوس	وجه داخلی وسط قوس	وجه داخلی انتهای گیردار	وجه داخلی انتهای گیردار

معیار دراگر پراگر (Drucker-Prager) نیز برای مدلسازی رفتار غیرخطی مصالح دانه‌ای نظیر خاک، و مصالح ترد و نیمه ترد نظیر صخره و بتن و ... پیش‌بینی شده است مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای لازم در معیارهای ویلیام وارنکه و دراگر پراگر در مدل‌سازی رفتار غیرخطی مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شده‌اند [۶].

جدول ۱۰- نتایج تحلیل غیرخطی تحت شتاب نگاشت زلزله کوبه

مکان	تاریخچه تغییر مکان افقی (متر)	تاریخچه تنش کششی ماکزیمم (مگاپاسکال)	تاریخچه تنش فشاری ماکزیمم (مگاپاسکال)
دایره‌ای	 <p>وجه داخلی وسط قوس</p>	 <p>وجه داخلی انتهای گیردار قوس</p>	 <p>وجه بیرونی انتهای گیردار قوس</p>
دسته زنبیلی	 <p>وجه داخلی وسط قوس</p>	 <p>وجه داخلی انتهای گیردار قوس</p>	 <p>وجه بیرونی انتهای گیردار قوس</p>
سه‌می (بدون خرابی)	 <p>وجه داخلی وسط قوس</p>	 <p>وجه داخلی انتهای گیردار قوس</p>	 <p>وجه داخلی انتهای گیردار قوس</p>
چهار مرکزی	 <p>وجه داخلی وسط قوس</p>	 <p>وجه داخلی انتهای گیردار قوس</p>	 <p>وجه بیرونی انتهای گیردار قوس</p>
شاخ بزی (نیم بیضی)	 <p>وجه داخلی وسط قوس</p>	 <p>وجه داخلی انتهای گیردار قوس</p>	 <p>وجه بیرونی انتهای گیردار قوس</p>

جدول ۱۱- تعدادی از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت شتابنگاشت طبس

نوع قوس	تاریخچه تغییر مکان افقی (متر)	تاریخچه تنش کششی ماکزیمم (MPa)	تاریخچه تنش فشاری ماکزیمم (MPa)
دایره‌ای			
مکان:	وجه داخلی وسط قوس	وجه داخلی انتهای گیردار قوس	وجه بیرونی انتهای گیردار قوس

افق ۴۶ درجه است). و ظرفیت باربری مقطع بطور بهینه استفاده می‌شود. پایداری استاتیکی قوس‌ها تحت بار ثقیلی از زیاد به کم به این ترتیب است: قوس شاخ بزی، سهمی، دسته زنبیلی، دایره‌ای و چهار مرکزی. همچنین پایداری لرزه‌ای قوس‌ها از زیاد به کم چنین بدست آمده است: قوس سهمی، دسته زنبیلی، چهار مرکزی، شاخ‌بزی و دایره‌ای. موقعیت مکانی شروع ترک‌ها در قوس‌هایی که دچار آسیب ناشی از بارگذاری لرزه‌ای می‌شوند در وجه داخلی قوس است. برای قوس‌های دایره‌ای و دسته زنبیلی محل ترک در وجه داخلی کلید طاق و در چهار مرکزی و شاخ بزی در وجه داخلی انتهای گیردار می‌باشد.

#### ۷- مراجع

- [1] زمرشیدی، ح.، "طاق و قوس در معماری ایران"، تهران مؤسسه کیهان، ۱۳۶۷
- [2] Gilbert, M. "Masonry Arches, Vaults and Domes", Engineering and Computational Mechanics, 2010, 163, 123-124.
- [3] Kumarci, K., Khosravayan, P., Mahmodic, I., Ziaied, A., Koochi, M., "Optimum Shape in Brick Masonry Arches under, Dynamic Loads by Cellular Automata", Journal of Civil Engineering (IEB), 2009, 37 (1), 73-90.
- [4] Boothby, T. E., "Manual for Assessment of Load-Bearing URM Buildings", Pennsylvania State University, 2006.
- [5] Hejazi, M. M., "Historical Buildings of Iran, the Architecture and Structure", Southampton, UK, 1997.
- [6] Pouraminian, M., Sadeghi, A., "Assessment of Seismic Behavior of the Historical Structures (Case Study: Tabriz Citadel)", 1<sup>st</sup> ICSR, Tabriz, Iran, 20-22 October, 2008.

منحنی تنش-کرنش آن نیز به صورت الاستیک-پلاستیک کامل می‌باشد و از سخت شوندگی کرنشی صرف نظر شده است. از میان ۵ قوس که دارای باربری ثقیلی مناسبی می‌باشند، قوس سهمی توانست بدون خرابی و ترک‌خوردگی بارگذاری لرزه‌ای زلزله کوبه، که بیشترین اثر را بر روی هر پنج قوس داشت، را تحمل نماید و ۴ قوس دیگر در زمان‌های مختلف دچار فروپاشی شدند که در جدول (۹) نشان داده شده است.

در کلیه قوس‌های ترک خورده، موقعیت مکانی شروع ترک‌ها در وجه داخلی قوس است که برای قوس‌های دایره‌ای و دسته زنبیلی در کلید طاق و در قوس‌های چهار مرکزی و شاخ بزی در انتهای گیردار می‌باشد. در جدول (۱۰) تاریخچه تغییر مکان، تنش کششی اصلی و تنش فشاری اصلی در محل‌های بحرانی نشان داده شده است. با توجه به زمان خرابی قوس‌ها طبق جدول (۹) می‌توان پایداری لرزه‌ای قوس‌ها را به ترتیب از زیاد به کم: قوس سهمی، دسته زنبیلی، چهار مرکزی، شاخ بزی و دایره‌ای نام برد. این نتایج، با مراجعه به رفتار قوس‌ها در زلزله‌های دیگر مثل طبس و منجیل نیز مشاهده می‌شود. در جدول (۱۱) نتایج تحلیل تحت شتاب نگاشت طبس نشان داده شده است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

برای دهانه و ضخامت یکسان در قوس‌های مختلف ایرانی مورد مطالعه در این تحقیق، قوس سهمی از نظر بارهای ثقیلی و جانبی، باربری مناسبتری دارد و قوس سروک فاقد مقاومت کافی تحت وزن خودش و سربار وارده می‌باشد. به طور کلی تحت بارهای ثقیلی افزایش خیز قوس موجب کاهش نیروی رانش طاق و افزایش نیروی قائم طاق می‌شود. نیروی برآیند طاق قوس سهمی، تقریباً موازی خط مماس بر قوس در طاق که باعث می‌شود تنش‌های کششی و فشاری در این ناحیه بحرانی به صورت یکنواخت باشد (در تحقیق حاضر، زاویه طاق با محور

## An Investigation on the Seismic Stability of Persian Brick Arches

M. Pouraminian<sup>1</sup>, A. Sadeghi \*<sup>2</sup> and S. Pourbakhshian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Islamic Azad University - Ramsar Branch

<sup>2</sup> Civil Engineering Department, Azerbaijan Shahid Madani University

### Abstract

The application of structural arch form in Iran goes back to as far as thousands of years ago. Arch is a fundamental component of Iranian architecture. Other structural systems such as vaults and domes which are used widely in variety of structures are indeed derived from arches. In the present study, the stability of various Iranian arches versus their weight, surcharge and earthquake action is investigated. The selected arches are some of the most applied Iranian arches like: parabolic-shaped arches, onion-shaped arches, four-centered pointed arches, obtuse angel arches and basket-handle arches. The selected arches are modeled in AutoCAD software and then are exported into the ANSYS software for necessary analyses. The static analysis, modal analysis and linear and non-linear dynamic analysis have been carried out on the finite element models of the arches. Comparison of the results of the analyses showed that for the same span and thickness in various Iranian arches analyzed in the present study, the parabolic-shaped arch has a better bearing with respect to gravity and lateral loads. The static stability of the arches under the gravity load increases with rise to span ratio of the arch. The other factor that affects the arch stability is its angle of contact to the baseline. According to the two above mentioned factors the stability of the selected arches increases in the following order: the semi-elliptical arch, the parabolic-shaped arch, basket-handle arch, circular arch and four-centered pointed arch. The eigen-value analyses have shown that the natural period of the arch is sensitive to the form of the crown. For the same span, the arches with tipped crown possess larger periods. In this regard, the fundamental period for parabolic arch is the least. This shows that this type of arch is stiffer than the other ones. For dynamic analysis of the selected arches, three strong ground motions of Kobe of Japan in 1995 ( $M_L=7.2$ ), Tabas of Iran in 1978 ( $M_L=7.8$ ) and Manjil of Iran in 1990 ( $M_w=7.4$ ) were selected. Again, the time history analysis of the arches shows that the strongest arch against the selected accelerograms is parabolic arch; and the order of relative seismic stability of the arches descending from high to low is as following: the parabolic-shaped arch, the basket handle arch, the four-centered pointed arch, the Semi-elliptical arch and the circular arch. Also, under the Kobe earthquake accelerogram, the parabolic arch showed no collapse. However, the other arches encountered collapse and among the circular arch collapsed at 5.8 seconds as the first arch and the basket handle arch collapsed at 8.5 as the last one. As another result, the location of cracks in the arches damaged by seismic loading was in the internal face of the arch.

**Keywords:** Seismic stability, Persian arches, FE modeling, Seismic vulnerability, Non-linear analysis, ANSYS.

-----  
**Received:** December 2011

**Accepted:** May 2012