تحقیقات بتن
سال هشتم، شمارهٔ اوّل
بهار و تابستان ۹۴
ص ۸۴ – ۷۱
تاریخ دریافت: ۱۴ /۹۳/۸
تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۲

بررسی اثر تعداد دهانه بر ظرفیت استاتیکی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با دهانه ۶ متری

مهدی یزدانی*
دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمدصادق معرفت
استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ایران

چکیده

پل‌های قوسی بنایی به تعداد زیادی در شبکه راه‌آهن کشور وجود دارند. این پل‌ها جهت بارهای سرویس طراحی شده‌اند، اما در طول سالیان گذشته این بارها به شدت افزایش یافته‌اند. برای ارزیابی ظرفیت این پل‌ها با توجه به رفتار پیچیده آنها، نیاز به آزمایش‌های بارگذاری و میدانی است. از آنجایی که به علت تعدد این پل‌ها امکان انجام آزمایش‌های میدانی وجود ندارد، بنابراین برای ارزیابی این پل‌ها نیاز به مدل‌سازی دقیق آنها می‌باشد. برای اینکه بتوان رفتار این پل‌ها را بهم مربوط کرد پاراماترهای زیادی وجود دارند که مهمترین آنها عبارتند از: اثر تعداد دهانه، اثر طول دهانه، اثر هندسه قوس و اثر سختی مصالح. آزمایش بارگذاری بر روی پل کیلومتر ۲۴ راه آهن قدیم تهران – قم که یک پل قوسی بتنی غیرمسلح با پنج دهانه شش متری است، مشخصات مهمی از جمله صلبیت بسیار بالای پل، سختی اولیه و الگوی ترک‌خردگی در پل را به نمایش گذاشته است. باتوجه به اینکه تعداد دهانه در این سازه‌ها بر ظرفیت باربری پل اثر مستقیمی دارد، در این مقاله سعی شده است با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYS، اثر تعداد دهانه بر مقاومت تسلیم این پل‌ها بررسی گردد. نتایج نشان می‌دهد که رفتار پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با یک دهانه کاملاً متفاوت با پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با تعداد دهانه‌های بیشتر از یک است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که که در پل‌های قوسی بتنی که بیش از یک دهانه دارند با افزایش تعداد قوس‌ها، مقاومت تسلیم کاهش و مقدار جابه‌جایی در کلید قوس افزایش می‌یابد. در نهایت روابطی جهت محاسبه مقدار مقاومت تسلیم و جابه‌جایی در پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با دهانه‌های ۶ متری به ازای تعداد دهانه‌های مختلف پیشنهاد گردیده است.

واژه‌های کلیدی: **پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح، مدل اجزاء محدود، اثر تعداد دهانه، مقاومت تسلیم پل‌های قوسی راه‌آهن.**

* نویسنده مسئول: m.yazdani@ut.ac.ir

۱-مقدمه

ارزیابی مقاومت باقی‌مانده پل‌های قوسی بنایی از مباحث مورد توجه مهندسان و محققان می‌باشد. در این ارزیابی، نیاز به مدل-سازی دقیق رفتار سازه می‌باشد، اما پیچیدگی موجود در رفتار این-گونه سازه‌ها منجر به انجام آزمایش‌های میدانی گردیده است، تا با استفاده از این آزمایش‌ها بتوان یک مدل‌سازی مناسب انجام داد و رفتار دقیق آن‌ها را مورد ارزیابی قرار داد.

مطالعه رفتار پل‌های قوسی با مصالح بنایی سابقه دیرینه در نقاط مختلف جهان دارد. از اولین محققین در این زمینه می‌توان به «پیپارد» و «هیمن» اشاره کرد. نتیجه نظریه‌ی پیپارد روش معروف نیمه تجربی مکزه و نتیجه نظریه‌ی هیمن، روش مکانیزم بوده است. اولین کاربرد آنالیز قوس‌ها با مصالح بنایی با استفاده از روش اجزاء محدود توسط تولر انجام شد. تولر نتایج تحقیق و مدل‌سازی خود را با کارهای آزمایشگاهی مقایسه کرد. در مدل او هیچ عملکرد تماسی بین قوس و مصالح پرکننده در نظر گرفته نشد، بنابراین کریسفیلد نشان داد با این شرایط روش اجزاء محدود منجر به بار گسیختگی کمتری نسبت به روش مکانیزم می‌شود، و برای رفع این مشکل، فنرهایی با رفتار غیرخطی برای شبیه‌سازی مقاومت جانبی مصالح پرکننده در نظر گرفت. مطالعات تولر بر اساس المان تیر مستقیم بود، راف کار تولر را ادامه داد و از المان‌های تیر خمیده استفاده کرد، چو نیز در ادمه کار تولر از المان‌های تیر مخروطی استفاده کرد. پیج از جمله محققینی است که آزمایش‌های فراوانی را بر روی این‌گونه پل‌ها انجام داده است. وی آزمایش‌های فراوانی را بر روی پل‌های قوسی سنگی تحت اثر بار سرویس و بار تخریب انجام داده است و به نتایج مهمی از جمله این‌که رفتار این پل‌ها خطی و تحت بارهای قائم رفتار آن‌ها به‌صورت دو بعدی است، رسیده است [۱].

از محققین دیگر در پل‌های قوسی بنایی لورنسو می‌باشد. وی از جمله کسانی است که بر تحلیل غیرخطی تأکید دارد. لورنسو حل این مسائل را به سه دسته تقسیم نموده است: حالت الاستیک، حالت غیرالاستیک و حالت پلاستیک. مطالعات او نشان داد که نتایج تحلیل در حالت الاستیک قابل اطمینان نیست [۲]. فانینگ و بوسبی آزمایش‌های میدانی زیادی روی پل‌های بنایی انجام داده‌اند و مدل‌های اجزاء محدود خود را با آنها مقایسه کرده‌اند. آنها با ارائه یک مدل سه بعدی، پیشنهاداتی را در نحوه مدل‌سازی ارائه کرده-اند. آن‌ها معتقد هستند که شکل و مقطع قوس و همچنین دیوارهای پیشانی به عنوان عناصر سازه‌ای پل، تأثیر مهمی در رفتار این سازه‌ها دارند [۳]. از محققین دیگر در این زمینه برینسیچ و سابیا هستند، آنها در یکی از مقالات خود پل تانارو را که در شمال ایتالیا قراردارد، مورد بررسی قرار داده‌اند. این پل دارای ۱۸ دهانه و در سال ۱۸۶۶ ساخته شده است. آنها با آزمایش‌هایی نظیر مغزه‌گیری، چکش اشمیت و تست‌های صوت، خصوصیات مختلف پل را تعیین کرده‌اند و یک رابطه برای بدست آوردن مدول الاستیسیته مصالح بنایی ارائه کرده‌اند. در ادامه آن‌ها با انجام یک آزمایش دینامیکی، فرکانس سازه در مودهای مختلف و نسبت‌های میرایی را بدست آورده‌اند. این محققین از بارگذاری سرویس برای کل دهانه‌ها و بار تخریب برای دو دهانه تحت شرایط مختلف استفاده کرده‌اند [۴]. ملبورن و همکارانش سه پل چند دهانه را مورد آزمایش قرار دادند و اثرات تعداد دهانه بر مقاومت نهایی پل را بدست آوردند. اگرچه آزمایش آنها بر روی اثرات دیوار جانبی متمرکز نشده بود، اما در یکی از پل‌ها که دارای دیوار جانبی منفصل بود، ۳۰٪ مقاومت کمتری را از خود نشان داد [۵]. ملبورن و همکارانش خستگی در پل‌های قوسی را نیز موررد بررسی قرار داده‌اند و مشاهده کرده‌اند در پل‌های قوسی مورد بررسی حدود ۴۰٪ مقاومت پل‌ها تحت اثر بار استاتیکی از بین می‌رود [۶]. ملبورن و همکارانش همچنین در یک مطالعه دیگر تأثیرات دیوار جانبی را بر روی مقاومت نهایی پل بررسی کرده‌اند و متوجه شدند که دیوارهای جانبی ۷۰٪ مقاومت نهایی پل را افزایش می‌دهند [۷]. رویلز و هنری مطالعات خود را بر روی ۲۴ پل قوسی متمرکز کرده بودند و اثرات پرکننده و دیوار جانبی را روی پل‌ها بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که پرکننده‌ها و دیوارهای جانبی بسته به مشخصات هندسی پل مقاومت پل را ۲ تا ۱۲ برابر افزایش می‌دهد. آنها همچنین در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که رفتار این سازه‌ها سه بعدی می‌باشد [۸]. بایراکتار و همکارانش پل قوسی دو دهانه‌ای را تحت اثر بار ناشی از عبور عابر پیاده آزمایش کردند و از یک مدل سه بعدی اجزاء محدود برای بدست آوردن مشخصات دینامیکی استفاده کردند [۹] و به این نتیجه رسیدند که کالیبراسیون یک امر ضروری در مدل‌سازی این سازه‌ها است [۱۰]. ارتگا و موریر نیز با مطالعه بر روی شش پل قوسی با تعداد دهانه‌های مختلف، اثر هندسه را بر ظرفیت پل‌های قوسی بنایی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۱]. معرفت و همکاران نیز در تحقیقات جداگانه‌ای

به این نتیجه رسیدند که ظرفیت استاتیکی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح بسیار بیشتر از بار سرویس می‌باشد [۱۲-۱۳] و [۱۸-۱۹]، همچنین با انجام تحلیل‌های دینامیکی به این نتیجه رسیدند که میرایی این پل‌ها بسته به طول دهانه و تعداد دهانه می‌تواند بین ۲-۱۰٪ متغیر باشد [۱۴].

در سال‌های اخیر نیز با توجه به اهمیت این پل‌ها در شبکه راه‌آهن بحث ارزیابی لرزه‌ای آن‌ها در مناطق زلزله‌خیز مورد توجه قرار گرفته است و تعداد معدودی پژوهش توسط پلا، یزدانی و معرفت انجام گردیده است [۱۵-۱۶] . همچنین یزدانی و معرفت در مرجع [۱۷] به ارزیابی رفتار دینامیکی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح تحت اثر عبور حرکت قطار پرداخته‌اند.

پل‌های قوسی بنایی را بسته به نوع مصالح‌شان، می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود:

۱- پل‌های قوسی آجری.۲- پل‌های قوسی سنگی. ۳- پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح.

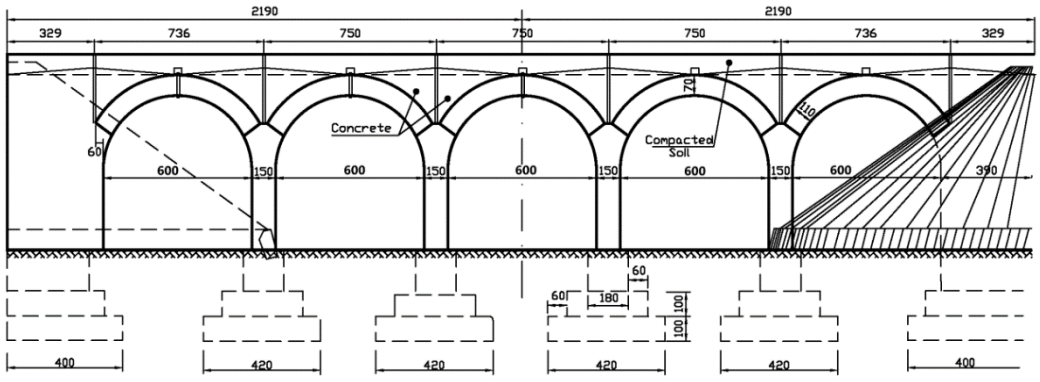
در زمینه پل‌های قوسی آجری و سنگی، با توجه به تعدد این پل‌ها در کشورهای اروپایی، تحقیقات گسترده‌ای بر روی آنها انجام شده است. اگرچه محققین این زمینه هنوز به روشی جامع و واحد برای تحلیل این سازه‌ها نرسیده‌اند، اما تا حدود زیادی رفتار این سازه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مورد پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با توجه به تعداد انگشت‌شمار آزمایش‌های میدانی، در این زمینه تحقیقات چندان زیادی انجام نشده است و فقط می‌توان به آزمایش معرفت و همکارانش در سال ۲۰۰۰ اشاره کرد [۱۸-۲۰].

در یک مطالعه میدانی مفصل، یک پل قوسی بتنی غیر مسلح در مسیر راه آهن تهران - قم تحت آزمایش بارگذاری قرار گرفته است. این پل از پنج دهانه ۶ متری تشکیل شده و بیش از ۷۰ سال از عمر آن می‌گذرد. در آزمایش استاتیکی با توجه به سختی بالای مصالح و هندسه پل، مشاهده گردید که رفتار پل تحت اثر بارهای استاتیکی به مراتب بیشتر از بارهای سرویس، کاملاً به‌صورت خطی است [۱۹]. در آزمایش بارگذاری این پل، ویژگی‌های مهمی از پل نظیر سختی اولیه، حد رفتار خطی ، الگوی ترک‌خردگی و مکانیزم‌های حاکم بر رفتار سازه مشخص شده است.

در حال حاضر در شبکه راه‌آهن کشور تعداد زیادی از این دسته پل‌ها با تعداد دهانه‌های مختلف وجود دارد. با توجه به نظر اکثر محققین، در تحلیل‌های استاتیکی چهار عامل تعداد دهانه، طول دهانه، هندسه قوس و مقاومت مصالح، عوامل تأثیرگذار در ظرفیت استاتیکی پل‌های قوسی بنایی هستند [۱-۱۱]، بنابراین هدف از مقاله حاضر به کمک نتایج به دست آمده از آزمایش میدانی، بررسی اثر تعداد دهانه بر ظرفیت استاتیکی این نوع سازه‌ها است.

۲- ویژگی پل مورد آزمایش

پل اکبر آباد در کیلومتر ۲۴ راه آهن قدیم تهران – قم واقع شده است و دارای پنج دهانه ۶ متری می‌باشد. سازه پل از نوع قوسی بتنی غیرمسلح می‌باشد و بیش از ۷۰ سال از ساخت آن می‌گذرد. در این پل ترک‌های اولیه‌ای به ضخامت حدود ۲ سانتی‌متر در کلید هر پنج قوس به صورت تمام عمق مشاهده گردیده است که پهنای آن‌ها از پایین به بالا کاهش یافته و در نیمه بالایی ضخامت قوس بسته به نظر می‌رسد. در شکل ۱ می‌توان این پل را مشاهده نمود، همچنین مشخصات هندسی پل در جدول ۱ آمده است. مشخصات مکانیکی مصالح با استفاده از آزمایش مغزه‌گیری بدست آمده است. در جدول ۲ می‌توان مشخصات مکانیکی مصالح را در اجزای مختلف سازه مشاهده نمود [۱۹].



شکل ۱- مقطع طولی پل قوسی بتنی اکبر آباد [۱۹]

جدول ۱- مشخصات هندسی پل [۱۹]

پل	تعداد دهانه	طول دهانه (متر)	شکل قوس	ضخامت کلید (متر)	ضخامت پاطاق (متر)	عرض قوس (متر)	ارتفاع پل (متر)	ضخامت دیوار جانبی (متر)
اکبرآباد	۵	۶	نیم دایره	۰/۷	۱/۱	۳/۹	۸	۱

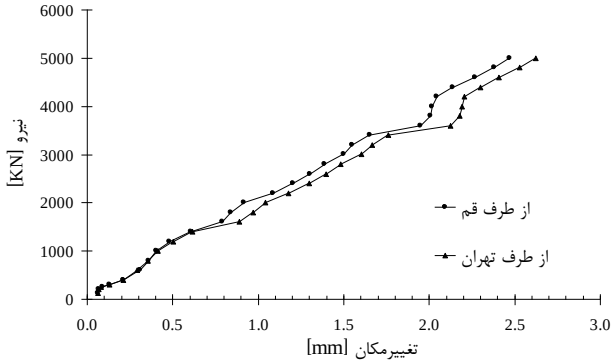
جدول ۲- مشخصات بتن از آزمایش مغزه‌گیری [۱۹]

عنوان	مقاومت فشاری بتن (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	وزن مخصوص (Kg/m^3)
بتن پرکننده	۷/۶	۱۰/۹	۲۲۱۷
قوس	۳۹/۴	۲۴/۹	۲۲۹۰
پایه	۳۱/۹	۳۶/۵	۲۲۵۰

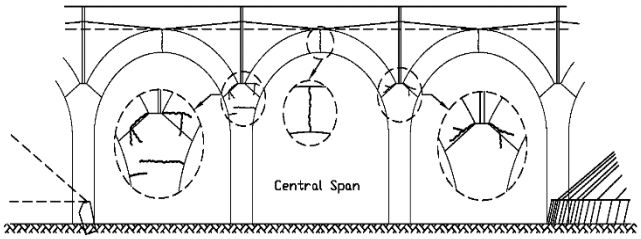
بارگذاری استاتیکی با استفاده از وزنه‌های ۴ تنی در دهانه وسط به طول ۶ متر انجام شده است. در شکل ۲ نحوه بارگذاری استاتیکی نشان داده شده است. در این آزمایش افزایش بار به صورت تدریجی صورت گرفته و هر بار افزایش بار، به میزان ۲۴ تن بوده است، تغییرمکان قائم کلید قوس مطابق شکل ۳ در هر بار افزایش بار، ثبت گردیده است.

شکل ۲- بارگذاری استاتیکی پل اکبرآباد [۱۹]

در این آزمایش، بارگذاری تا بار ۵۰۰ تن ادامه یافته و به علت عدم امکان بارگذاری بیشتر، سازه تا بار تخریب بارگذاری نشده است. اگرچه میزان بار آزمایش خیلی بیشتر از بار سرویس پل می‌باشد، اما مقاومت نهایی پل در آزمایش به علت محدودیت‌های میدانی بدست نیامده است. در یک مطالعه مجزا مقاومت نهایی پل توسط معرفت و یزدانی در مرجع [۱۲] پیش‌بینی شده است. در شکل ۴ ترک‌های اولیه و ثانویه ایجاد شده در پل نشان داده شده است. ترک‌های موجود در کلید قوس اولیه هستند و ترک‌های موجود در پاطاق و پایه‌های پل در حین بارگذاری به‌وجود آمده‌اند (ترک‌های ثانویه).



شکل ۳- منحنی جابه‌جایی قائم – نیرو در قوس میانی [۱۹]



شکل ۴- ترک‌های اولیه در کلید و ترک‌های ثانوی به وجود آمده در پاطاقها در حین بارگذاری [۱۹]

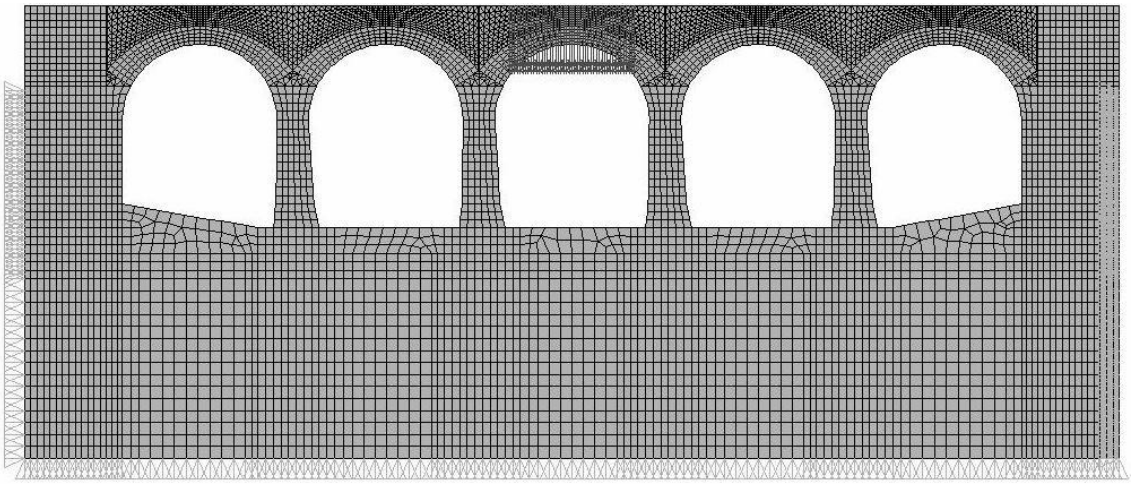
۳- مدل‌سازی عددی سازه

رفتار واقعی سازه به شرایط گیرداری تکیه‌گاه‌ها، خواص واقعی مصالح، تغییر خواص در مقاطع مختلف، اثر خستگی، اندازه و موقعیت ترک‌ها و غیره بستگی دارد. همچنین لازم است که رفتار مصالح پرکننده و اندرکنش خاک و پی به‌صورت مناسبی مد نظر

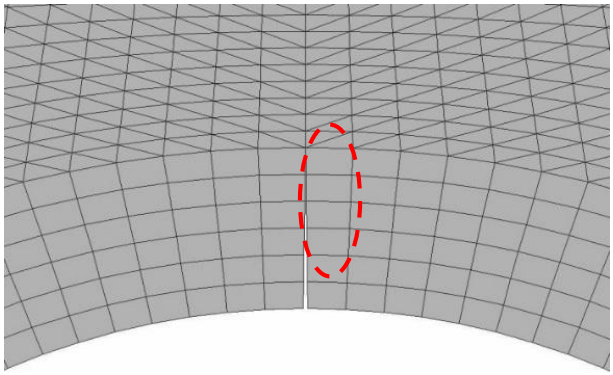
قرار گیرد. در عمل اعمال تمامی این ویژگی‌ها به صورت دقیق نامقدور است. از این‌رو به ناچار برخی از عوامل فوق به‌صورت غیرمستقیم وارد مدل‌سازی می گردند.

در مقاله حاضر از مدل‌های صحت سنجی‌شده در پژوهش‌های گذشته از جمله مراجع [۱۲-۱۴] و [۱۶-۱۹] استفاده می گردد. در مطالعات قبلی مدل اجزاء محدود بهنگام‌شده این سازه بدست آمده است. تحقیقات انجام شده نشان داد که بار تسلیم پل پنج دهانه‌ای حاضر تحت اثر بارهای قائم برابر ۹۷۹ تن و ظرفیت نهایی (بار معادل لحظه خرابی) آن ۱۸۶۹ تن است. جزئیات بیشتر مربوط به محاسبه ظرفیت تسلیم و نهایی پل‌های قوسی بتنی در مراجع [۱۲] و [۱۳] نشان داده شده است. در این مدل‌سازی اجزای مختلف سازه، شامل قوس‌ها، پایه‌ها، دیوارهای جانبی و خاک مطابق با وضعیت موجود پل و نقشه‌های موجود با تمام جزئیات مدل‌سازی گردیده است. با توجه به رفتار دو بعدی این سازه‌ها تحت اثر بارهای قائم [۱-۴]، [۱۲-۱۴] و [۱۶-۲۰]، مدل اجزای محدود از نوع کرنش مسطح در نظر گرفته شده و از المان‌های PLANE42 و PLANE82 در نرم‌افزار ANSYS استفاده گردیده است. همچنین جهت مدل-سازی رفتار مصالح از معیار غیرخطی دراکر – پراگر که یک معیار بسیار مناسب برای مصالح بنایی است، استفاده گردیده است.

خاک تا عمق ۱۰ متری و پل مطابق با جزئیات کامل مدل‌سازی گردیده است. در شبیه‌سازی حاضر، شرایط مرزی مدل و مشخصات مکانیکی خاک به‌عنوان پارامترهای نامعین در فرایند کالیبراسیون آنچنان محاسبه شده‌اند که پاسخ سازه مطابق با آزمایش گردد. مدل نهایی و شرایط مرزی سازه صحت سنجی شده در شکل ۵ نشان داده شده است. ترک‌های اولیه به صورت فضای خالی در نظر گرفته شده‌اند که در شکل ۶ نحوه مدل‌سازی آن‌ها نشان داده شده است. بنابراین مشخصات مکانیکی نهایی مدل مطابق جدول ۳ بدست آمده است. در شکل ۷ منحنی پاسخ پل تا بار تسلیم همراه با نتایج تست میدانی ارائه شده است. برای مشاهده جزئیات بیشتر به مرجع [۱۲] مراجعه گردد.



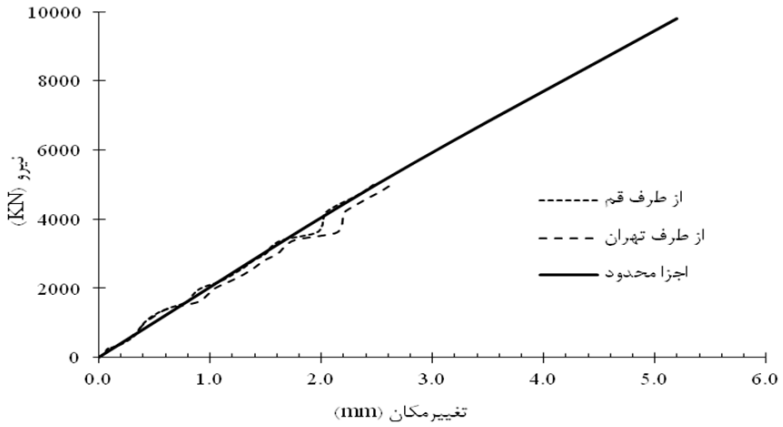
شکل ۵- مدل اجزای محدود و شرایط مرزی [۱۲]



شکل ۶- مدلسازی ترک‌های اولیه در کلید قوس [۱۲]

جدول ۳- مشخصات نهایی اعضای سازه‌ای [۱۲]

عنوان	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص (Kg/m^3)	ضریب چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)
قوس	۲۴.۹	۰.۱۶۷۶	۲۲۹۰	۶.۵۹۱	۵۳
پایه	۳۶.۵	۰.۱۸۰۸	۲۲۵۰	۵.۶۱۷	۵۱.۲
پرکننده	۱۰.۹	۰.۲۸۸۳	۲۲۱۷	۱.۹۱۵	۳۶.۵
خاک	۷	۰.۳۳	۲۰۰۰	۱	۳۰



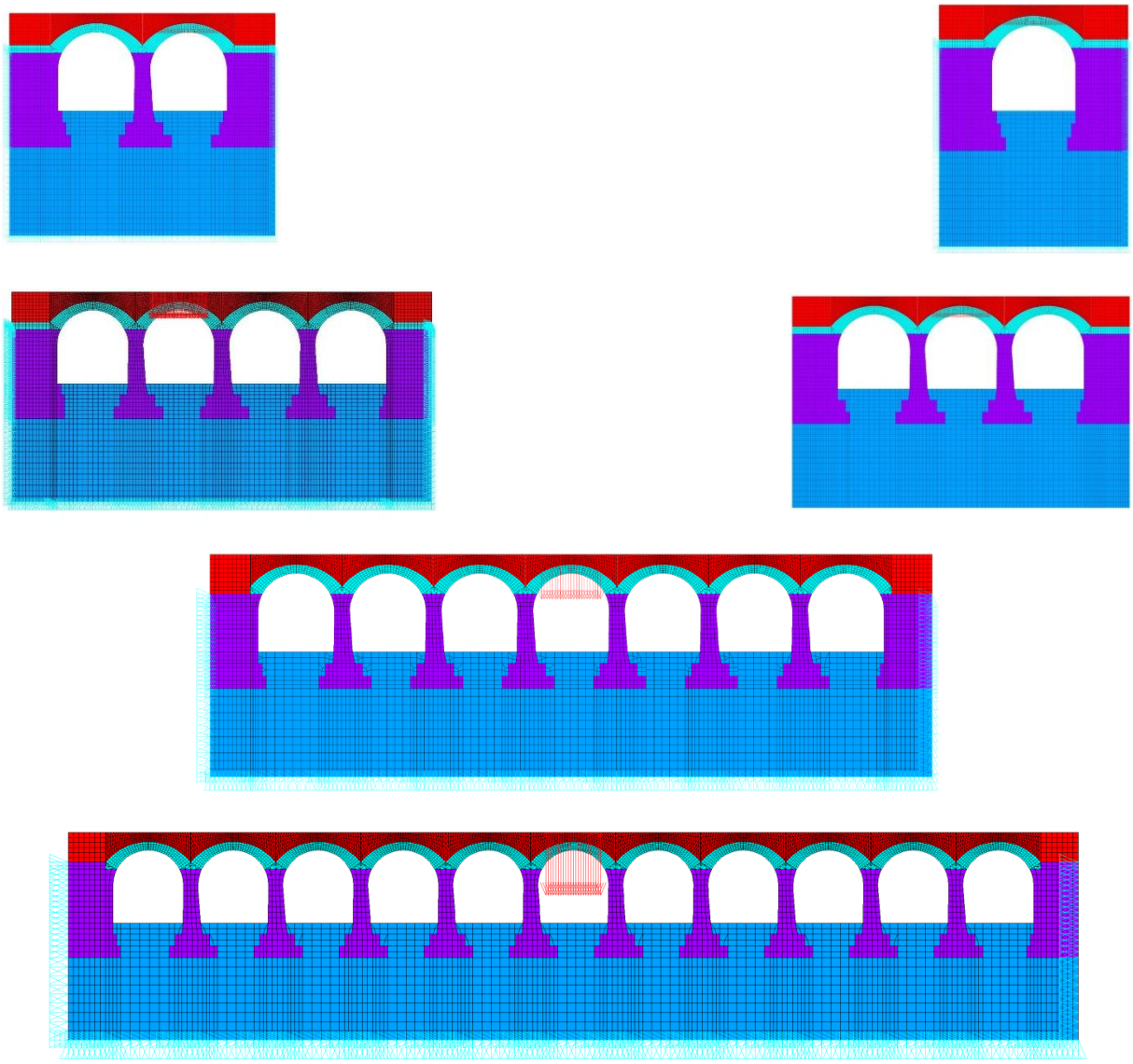
شکل ۷: منحنی نیرو - تغییرمکان قائم پل مورد نظر تا بار تسلیم [۱۲]

۴- اثر تعداد دهانه بر مقاومت تسلیم پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح

با توجه به رفتار پیچیده پل‌های قوسی بنایی، عوامل زیادی بر ظرفیت نهایی این سازه‌ها مؤثر است که به‌طور کلی می‌توان آنها را به چهار دسته از جمله: اثر طول دهانه، اثر تعداد دهانه، اثر شکل قوس و اثر سختی سازه تقسیم بندی نمود. در بررسی هر کدام از این عوامل مطالعات وسیعی صورت گرفته است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به بررسی اثر تعداد دهانه در کارهای پیچ [۱] و ملبورن [۴-۵] تحت بارهای استاتیکی در پل‌های قوسی آجری و سنگی اشاره کرد. در سال ۲۰۱۵ نیز بایراکتر و همکاران با انجام مطالعات وسیعی روابطی را جهت محاسبه فرکانس اصلی ومیرایی پل‌های قوسی سنگی با تعداد دهانه‌های مختلف پیشنهاد داده‌اند [۲۱]. همان‌طور که اشاره گردید پل‌های قوسی بنایی از لحاظ جنس مصالح به سه دسته آجری، سنگی و بتنی غیرمسلح تقسیم می‌شوند. با توجه به تعدد پل‌های قوسی سنگی و آجری مطالعات وسیعی بر روی آنها انجام گرفته است، این در حالی است که در مورد پل‌های قوسی بتنی مطالعات کمتری انجام گرفته است. از طرفی در نظر گرفتن همه عوامل طول دهانه، تعداد دهانه، شکل قوس و مقاومت مصالح در یک پژوهش نیاز به جمع‌آوری اطلاعات وسیعی از مشخصات پل‌ها را دارد. به همین منظور در مقاله حاضر به بررسی اثر تعداد دهانه بر ظرفیت پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با استفاده از نتایج محدود از آزمایش‌های میدانی صورت می‌گیرد.

در مطالعه حاضر با استفاده از مدل بهنگام شده که در مرجع [۱۲] و [۱۳] مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است، اثر تعداد دهانه بر ظرفیت استاتیکی، مقاومت تسلیم و مکانیزم تخریب مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌های نشان داده شده در شکل ۸ براساس مشخصات هندسی مطابق جدول ۱ و مصالح مطابق جدول ۲ کاملاً مشابه پل کیلومتر ۲۴ ره‌آهن تهران – قم تهیه گردیده‌اند.

با توجه به اینکه بارگذاری استاتیکی فقط در یک دهانه انجام شده است، می‌توان گفت که مکانیزم حاکم بر رفتار این مدل‌ها با تعداد دهانه‌های مختلف یکسان می‌باشد. تنها تأثیر تعداد دهانه بر این مدل‌ها را می‌توان در تغییر صلبیت (گیرداری و سختی) سازه مشاهده کرد.

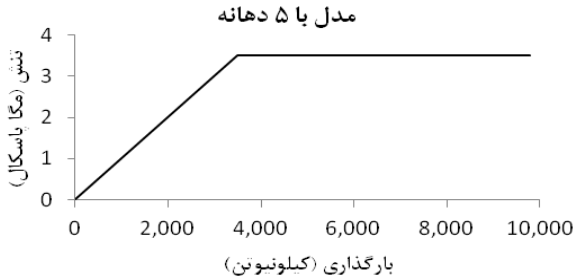


شکل ۸- مدل‌های اجزا محدود مورد بررسی با دهانه‌های مختلف

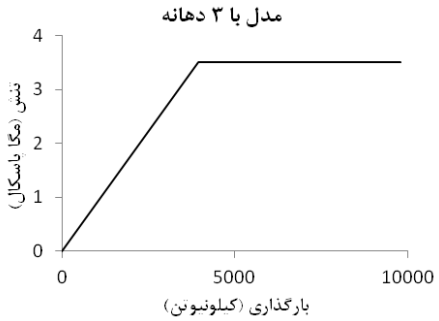
این پدیده را می‌توان با یک تیر سراسری پنج دهانه که در دهانه وسطی بارگذاری شده است، تعبیر کرد که در آن هرچه تعداد دهانه‌ها کمتر باشد صلبیت تیر نیز بیشتر می‌شود [۲۲]. به همین منظور با توجه به مطالب گفته شده برای بدست آوردن مقاومت تسلیم پل مورد نظر با دهانه‌های مختلف، از این ایده استفاده می‌شود که مکانیزم حاکم بر کل مدل‌ها یکسان است، بنابراین می‌توان فرض کرد که سطح تنش در کلید قوس دهانه‌هایی که بارگذاری شده‌اند کاملاً مشابه یکدیگر است. در پل‌های قوسی بنایی کلید قوس به عنوان یک نقطه بحرانی شناخته می‌شود، و به همین منظور سطح تنش در این نقطه انتخاب گردیده است. در شکل ۹ میزان تنش در کلید قوس میانی پل اکبرآباد که دارای پنج دهانه است تا نقطه تسلیم (۹۷۹ تن) براساس مرجع [۱۲] نشان داده است. اگر نمودار حاضر (شکل ۹) را برای مدل‌های دارای دهانه‌های مختلف براساس شکل ۸ محاسبه گردد، میزان تنش در کلید قوس مطابق با شکل ۱۰ برای همه مدل‌ها بدست خواهد آمد. با مقایسه تنش در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که مقادیر تنش اندکی با یکدیگر در مدل‌های مختلف، متفاوت هستند. در همه مدل‌ها به جز مدل دارای یک دهانه، حداکثر تنش ۳/۵ مگاپاسکال است.

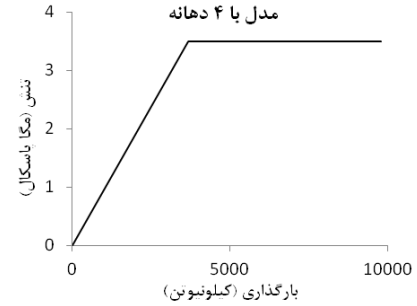
در مدل‌های ۲ تا ۱۱ دهانه، تنها تفاوت آن‌ها بار متناظر با تنش ۳/۵ مگاپاسکال است که علت این امر به علت افزایش صلبیت مطابق مطالب گفته شده است. در جدول ۴ بار متناظر با تنش ۳/۵ مگاپاسکالی نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده

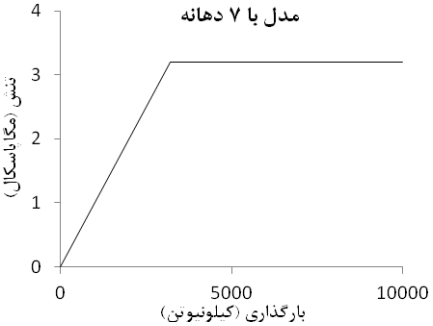
نکته قابل ذکر این است که مدل دارای یک دهانه دارای مکانیزم رفتاری متفاوت با سایر مدل‌هاست. علت این امر به این دلیل است که مدل دارای یک دهانه مانند یک تیر دو سرگیردار رفتار می‌کند که رفتار آن با تیرهای سراسری کاملاً متفاوت است و برای بدست آوردن مقاومت تسلیم و نهایی آن باید از روش‌های دیگری استفاده شود. در این پژوهش از ارزیابی پل‌هایی با یک دهانه صرف نظر می‌شود و فقط رفتار پل‌های چند دهانه‌ای بررسی خواهد شد.

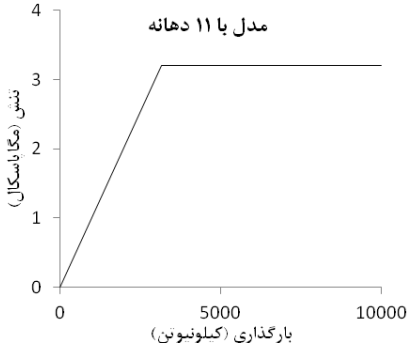


شکل ۹: میزان تنش در کلید قوس پل اکبرآباد تا نقطه تسلیم [۱۲].









شکل ۱۰- میزان تنش در کلید قوس مدل‌ها با دهانه‌های متفاوت

جدول ۴- اثر تعداد دهانه بر مقاومت تسلیم

مدل	میزان بار متناظر با تنش در نقطه تسلیم (تن)
مدل دارای ۱۱ دهانه	۳۱۶
مدل دارای ۷ دهانه	۳۲۰
مدل دارای ۵ دهانه	۳۵۰
مدل دارای ۴ دهانه	۳۶۸
مدل دارای ۳ دهانه	۳۹۵
مدل دارای ۲ دهانه	۶۱۹

در ادامه با توجه به رفتار یکسان این مدل‌ها، با تعریف یک ضریب می‌توان مقاومت تسلیم سایر مدل‌ها را بدست آورد. در پل پنج دهانه مقاومت تسلیم ۹۷۹ تن بدست آمده است [۱۲]، اگر نسبت مقاومت تسلیم به میزان بار متناظر با تنش ۳/۵ مگا پاسکال مطابق فرضیات ارائه شده یکسان باشد، مقاومت تسلیم سایر مدل‌ها بدست می‌آید، بنابراین ضریب مورد نظر از تقسیم دو عدد ۹۷۹/۳۵۰ که برابر ۲/۸ بدست می‌آید. اگر این ضریب را در مقدار بار متناظر با تنش ۳/۵ مگا پاسکال در سایر مدل‌ها ضرب کرد، مقاومت تسلیم آنها بدست خواهد آمد که در جدول ۵ مشخصات متناظر در نقطه تسلیم در همه مدل‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، مدل‌های دارای ۳، ۴، ۵، ۷ و ۱۱ دهانه، دارای مشخصات یکسانی هستند. در مدل دارای دو دهانه اگرچه میزان تنش آن در کلید مشابه سایر مدل‌ها بود، اما نتایج بدست آمده برای آن با سایر مدل‌ها متفاوت است که می‌توان علت آن را این چنین توجیه کرد: با توجه به اینکه در مدل دو دهانه‌ای فقط در یک طرف از دهانه بارگذاری شده، قوس وجود دارد، بر صلبیت سازه افزوده شده و رفتار سازه سخت‌تر می‌گردد (مشابه تیر یک سر گیردار – یک سر مفصل). بنابراین در پل‌های دو دهانه‌ای نیز با توجه به وجود قوس، فقط در یک طرف سازه، مکانیزم حاکم بر رفتار آنها اندکی متفاوت با سایر پل‌های چند دهانه‌ای است.

جدول ۵- مشخصات نقاط تسلیم

مدل‌ها	مقاومت تسلیم (تن)	تغییرمکان متناظر نقطه تسلیم (میلی‌متر)	تغییرمکان متناظر با بار ۵۰۰ تنی آزمایش
مدل دارای ۱۱ دهانه	۸۸۴	۵/۸۹	۳/۱۸
مدل دارای ۷ دهانه	۸۹۶	۵/۸۴	۳/۱۴
مدل دارای ۵ دهانه	۹۷۹	۵/۴۵	۲/۷
مدل دارای ۴ دهانه	۱۰۲۹	۵/۶۳	۲/۶۳
مدل دارای ۳ دهانه	۱۱۰۴	۶	۲/۵۷
مدل دارای ۲ دهانه	۱۷۳۱	۱۴/۵۷	۲/۳۴

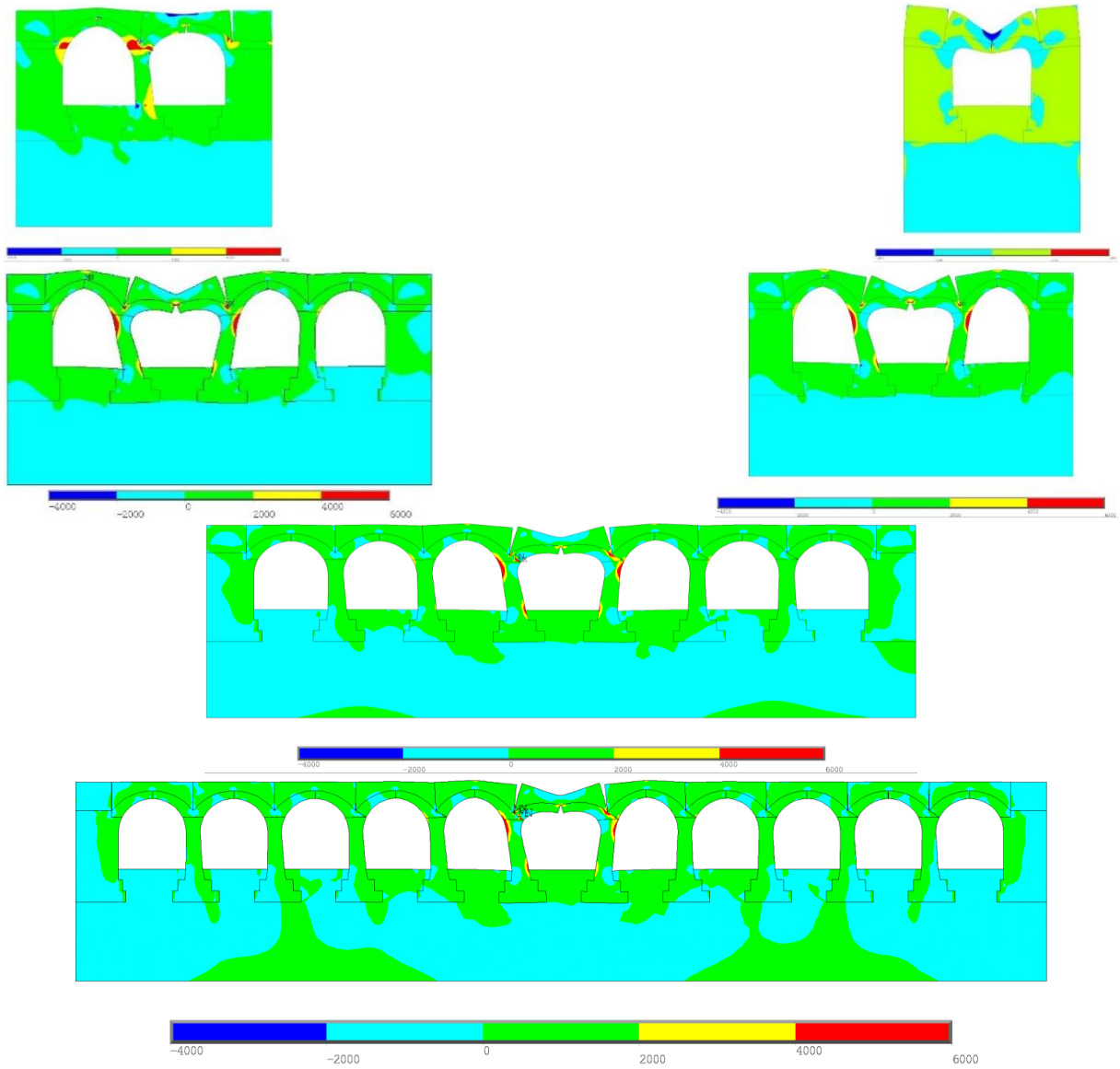
روشی دیگر که بتوان با آن نقطه تسلیم را پیش‌بینی کرد، استفاده از تغییرمکان معادل است. در مدل پنج دهانه‌ای، نقطه تسلیم ۹۷۹ تن و تغییرمکان معادل آن ۵/۴۵ میلی‌متر بدست آمد. اگر فرض شود که در تغییرمکان معادل ۵/۴۵ میلی‌متری مدل‌ها تسلیم می‌شوند، می‌توان مقاومت تسلیم سایر مدل‌ها را بدست آورد [۱۲]. بنابراین با استفاده از جدول ۵ و ۶ می‌توان گفت که نتایج حاصل از بار معادل، یک حد بالا و نتایج حاصل از تغییرمکان معادل، یک حد پایین برای پیش‌بینی مقاومت تسلیم پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح است و قطعاً بار تسلیم در بین این اعداد قرار دارد. در شکل ۱۱ وضعیت مدل‌ها با دهانه‌های مختلف در تنش تسلیم نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مکانیزم تشکیل مفصل در مدل‌های ۳، ۴، ۵، ۷ و ۱۱ کاملاً مشابه هستند. مدل دارای دو دهانه اندکی متفاوت و مدل دارای یک دهانه کاملاً رفتار متفاوتی دارد. بنابراین همان‌طور که از شکل ۱۱ مشخص است، در صورتی

که در اطراف دهانه‌ای که بارگذاری می‌شود، دهان‌هایی وجود داشته باشد، مکانیزم تشکیل مفاصل یکسان است و در صورتی‌که دهانه‌ای وجود نداشته باشد مکانیزم متفاوت است که این موضوع در مدل با یک و دو دهانه مشاهده گردید.

جدول ۶: مقاومت تسلیم مدل‌ها بر مبنای تغییرمکان معادل

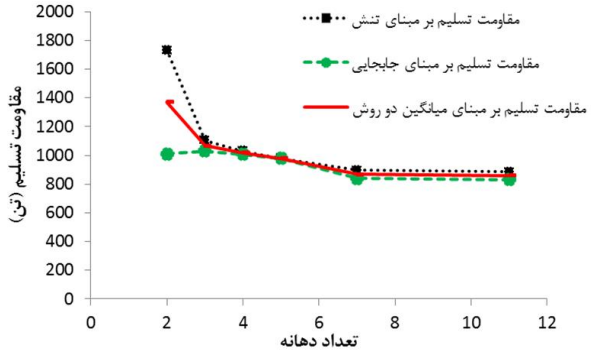
مدل‌ها	بار معادل با تغییرمکان ۵/۴۵ میلی‌متر (تن)
مدل دارای ۱۱ دهانه	۸۳۲
مدل دارای ۷ دهانه	۸۳۹
مدل دارای ۵ دهانه	۹۷۹
مدل دارای ۴ دهانه	۱۰۰۶
مدل دارای ۳ دهانه	۱۰۳۰
مدل دارای ۲ دهانه	۱۰۱۰

لازم به ذکر است که در تحلیل قوس‌ها، با ایجاد چهار مفصل قوس دچار مکانیزم می‌شود، این در حالی است که در پل‌های قوسی ایجاد مکانیزم کاملاً به مشخصات هندسی قوس‌ها بستگی دارد. نتایج حاصل از تحقیقات پیج نشان می‌دهد که پل‌های قوسی با طول دهانه کمتر از ۶ متر دارای مکانیزم کاملاً متفاوتی با پل‌های قوسی با طول دهانه بیشتر از ۲۰ متر (با فرض صخامت یکسان قوس‌ها) هستند. در پل‌های با دهانه‌های بزرگ، قوس‌ها با ایجاد ۴ مفصل مکانیرم شده، این درحالی است که در پل‌های با دهانه‌های کوچک، ایجاد مکانیزم با ۳ مفصل نیز مشاهده شده است [۱]. در شکل ۱۱ نیز این امر مشاهده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مکانیزم ایجاد مفاصل در مدل یک دهانه کاملاً متفاوت با سایر مدل‌هاست.

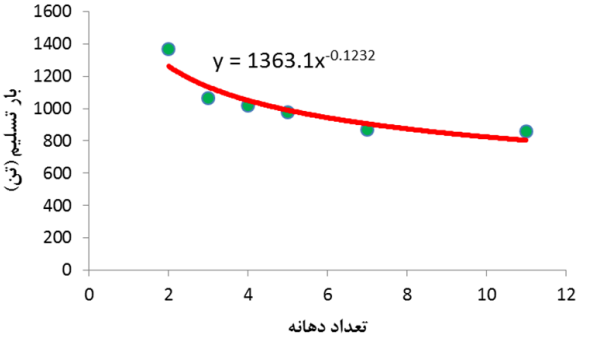


شکل ۱۱- مکانیزم تشکیل مفصل در تمامی مدل‌ها با دهانه مختلف.

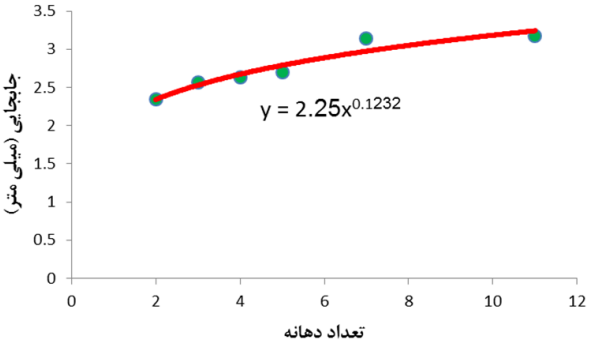
برای بدست آوردن مقامت تسلیم پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح که دارای مشخصات هندسی و مکانیکی یکسانی (از جمله شکل قوس و مصالح یکسان) با پل اکبرآباد هستند، می‌توان براساس شکل ۱۲ و ۱۳ از تابع $p = 1363.1.9n^{-0.186}$ که حاصل از برازش مقادیر مقاومت تسلیم دهانه‌های مختلف هستند، استفاده نمود. همچنین در شکل ۱۴ با استفاده از تابع $y = 2.25n^{0.1232}$ که حاصل از برازش مقادیر تغییرمکان دهانه‌های مختلف در بار ۵۰۰ تنی آزمایش هستند، تغییرمکان پل‌های مشابه اکبرآباد با هر دهانه‌ای را بدست آورد. در این رابطه‌ها n تعداد دهانه، p بار تسلیم برحسب تن و y جابه‌جایی کلید قوس بارگذاری شده برحسب میلی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به توضیحات ارائه شده استفاده از این رابطه به‌ازای $n = 1$ اصلاً مناسب نبوده و همچنین به‌ازای $n \geq 3$ نتایج از دقت بسیار مناسبی برخوردار است. برای $n = 2$ نیز نتایج از خطای قابل قبولی نیز برخوردار می‌باشد. در مورد تابع توانی انتخاب شده لازم به ذکر است با توجه به اینکه در مرجع [۲۱] برای بیان فرکانس به‌ازای تعداد دهانه از تابع لگاریتمی استفاده گردیده است، در پژوهش حاضر نیز تابع توانی به چندجمله‌ای‌ها و سایر توابع جهت برازش ترجیح داده شده است. در ادامه برای صحت سنجی رابطه ارائه شده یک پل‌قوسی با تعداد ۱۷ دهانه با ANSYS مدل گردید. با استفاده از رابطه پیشنهاد شده در این پژوهش مقاومت تسلیم پل برابر ۸۰۵ تن و جابه‌جایی متناظر با بار ۵۰۰ تن برابر ۳/۱۹ میلی‌متر محاسبه می‌گردد. نتایج حاصل از مدل‌سازی پل ۱۷ دهانه نشان می‌دهد که بار تسلیم با استفاده از روش حد بالا برابر ۸۳۸ تن و با استفاده از روش حد پایین برابر ۷۹۴ تن است. همچنین و جابه‌جایی متناظر با بار ۵۰۰ تن برابر ۳/۲۲ میلی‌متر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای مدل با ۱۷ دهانه توابع پیشنهادی از دقت بسیار مناسبی برخوردار هستند. در مقاله حاضر مطالعات بر روی پل‌های قوسی با دهانه ۶ متری که دارای تعداد دهانه‌های مختلفی هستند، صورت گرفت. به‌طور کلی می‌توان روندی مشابه را برای سایر پل‌ها با طول دهانه‌های متفاوت با ۶ متر را استفاده نمود. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که روند تغییرات جابه‌جایی و مقاومت تسلیم سایر پل‌ها مشابه مطالعه حاضر است، با این تفاوت که مقادیر آن‌ها متفاوت است.



شکل ۱۲: مقاومت تسلیم پل‌های قوسی با دهانه شش متر



شکل ۱۳: پیشنهاد یک تابع جهت محاسبه بار تسلیم پل‌های قوسی با دهانه شش متر



شکل ۱۴: پیشنهاد یک تابع جهت محاسبه تغییرمکان در کلید قوس تحت بار ۵۰۰ تن پل‌های قوسی با دهانه شش متر

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر نتایج مدل‌سازی عددی برای تعیین اثر تعداد دهانه بر روی یک پل قوسی بتنی غیرمسلح با پنج دهانه شش متری ارائه گردید. پل اکبرآباد که در کیلومتر ۲۴ راه آهن قدیم تهران – قم واقع است، قبلاً تحت آزمایش بارگذاری قرار گرفته و مشخصات مهمی نظیر سختی اولیه، صلبیت بالا و الگوی ترک‌خردگی در آن مشخص شد. در این مقاله سعی شد با استفاده از نتایج بدست آمده

از آزمایش پل اکبرآباد [۱۹] و مقاومت تسلیم بدست آمده در مراجع [۱۲-۱۳]، به کمک مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار ANSYS، اثر تعداد دهانه بر مقاومت تسلیم پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با دهانه شش متری مورد بررسی قرار گیرد. نتایج بدست آمده نشان دادند که رفتار پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح که دارای یک دهانه هستند کاملاً متمایز از پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با تعداد دهانه‌های بیشتر از یک است. در این مطالعه مشخص گردید که با افزایش تعداد دهانه مقاومت تسلیم کاهش و تغییرمکان در کلید قوس افزایش می‌یابد و در ادامه توابعی که حاصل از برازش نتایج مربوط به دهانه‌های مختلف بود، برای محاسبه مقاومت تسلیم و جابه‌جایی کلید قوس برای پل‌هاب قوسی با دهانه شش متری ارائه گردید. همچنین مشاهده گردید که وجود یا عدم وجود دهانه در اطراف دهانه‌ای که بارگذاری می‌شود، باعث ایجاد حالت‌های مختلف تشکیل مفاصل در قوس‌ها می‌گردد. بنابراین می‌توان نتایج حاصل از پژوهش حاضر را به‌طور خلاصه به‌صورت زیر بیان نمود:

- پیش‌بینی مقاومت تسلیم پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با استفاده از نتایج محدود از آزمایش بارگذاری
- مشاهده رفتار متفاوت پل‌های تک دهانه با پل‌های چند دهانه
- مکانیزم ایجاد مفصل در پل‌های قوسی کاملاً به تعداد دهانه-های اطراف دهانه بارگذاری شده وابسته است. به‌طوری که اگر در اطراف دهانه بارگذاری شده دهانه‌ای وجود نداشته باشد (پل تک دهانه و دو دهانه)، مکانیزم ایجاد مفصل‌ها متفاوت خواهد بود.
- ارائه روابطی جهت محاسبه بار تسلیم و جابه‌جایی معادل بار ۵۰۰ تن برای پل‌های قوسی بتنی غیر مسلح با طول دهانه ۶ متر و هندسه مشابه پل اکبرآباد

در نهایت از آنجاکه پل‌های قوسی با دهانه‌های مختلف به تعداد زیادی در شبکه راه‌آهن کشور موجود هستند و برای ارزیابی مقاومت باقی‌مانده این پل‌ها امکان آزمایش‌های میدانی برای تمامی‌این پل‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد، روابط ارائه شده در این تحقیق گام مؤثری در پیش‌بینی مقاومت و ارزیابی مقاومت باقی‌مانده در مورد پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با دهانه‌های مختلف می‌باشد.

۶- مراجع

[1]. Page, J. "masonry arch bridges", TRL State of the art review, London, 1993.

[2]. Lourenco, P.B. "analysis of historical construction: from thrust-line to advanced simulation", Historical Construction, P.B Lourenco, P. Roca (Eds), 2001.

[3]. Fanning, P.J. and Boothby, T.E. "three-dimensional modeling and full-scale testing of stone arch bridges", computers and structures, no. 79, pp. 2645 – 2662, 2001.

[4]. Brencich, A. and Sabia, D. "experimental identification of a multi-span masonry bridge: the tanaro bridge", Construction and Building Materials, No. 22, pp. 2087 – 2099, 2008.

[5]. Melbourne, C. Gilbrt, M. "the behaviour of multiring brickwork arch bridges", structural engineering, 73 (3), 1995.

[6]. Melbourne, C. Walker P. "load tests to collapse of model brickwork masonry arches", proceeding. 8th international brick and block masonry conference, 2: new york, 991-1002, 1996.

[7]. Melbourne, C. Gilbrt, M. Wagstaff, M. "the collapse behavior of mulispan brickworck arch bridges", structural engineering, 75 (17): 297-304, 1997.

[8]. Royles, R. Hendry, A. W. "model tests on masonry arches", proc. instn civ. engrs & bldgs, 299-321, 1992.

[9]. Bayraktar, A. Althnisik, A. C. Birinci, F. Sevim, B. Turker, T. "finite-element analysis and vibration testing of a two-span masonry arch bridge", journal of performance of, constructed facilities, 24 (1): 46-52, 2010.

[10]. Sevim, B. Bayraktar, A. Altunişik, A. C. Atamturktur, s. and Birinci, F. "finite-element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridge", finite elements in analysis and design, vol. 47, pp. 621-634, 2011.

[11]. Artega, I. Morer, P. "the effect of geometry on the structural capacity of masonry arch bridges", constraction and building materials, 34, 97-106, 2012.

[۱۲]. معرفت، محمدصادق و یزدانی، مهدی. «پیش‌بینی مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی پل قوسی بتنی غیرمسلح اکبرآباد با استفاده از تحلیل غیرخطی»، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره سیزدهم، شماره ۲، صفحه ۱۰۹-۱۱۸، ۱۳۹۲.

[۱۳]. معرفت، محمدصادق، یزدانی، مهدی و عطایی، شروان. «برآورد مقاومت نهایی یک پل قوسی بتنی غیرمسلح بر پایه نتایج محدود از آزمایش بارگذاری»، مجله علمی پژوهشی مهندسی

عمران و محیط زیست امیرکبیر، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحه ۴۷-۵۹، زمستان ۱۳۹۳.

[۱۴]. یزدانی، مهدی و معرفت، محمدصادق. "تخمین میزان میرایی پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح با استفاده از تحلیل دینامیکی"، دومین کنفرانس بین‌المللی اکوستیک و ارتعاشات، دانشگاه صنعتی شریف، ۴ و ۵ دی ماه، ۱۳۹۱.

[15]. Pela, L. Aprile, A. Benedetti, A. "seismic assessment of masonry arch bridges", engineering structures, 31: 1777-1788, 2009.

[16]. Yazdani, M. Marefat, M.S. "seismic assessment of six meter spans plain concerete arch bridge", journal of seismology and earthquake engineering (JSEE), 1, 72-82, 2013.

[۱۷]. یزدانی، مهدی و معرفت، محمدصادق. " بررسی اثر رفتار دینامیکی بار قطار بر روی پاسخ پل های قوسی بتنی غیرمسلح در حوزه فرکانس"، مجله علمی ترویجی صوت و ارتعاش، دوره سوم، شماره ۶، صفحه ۴۳-۵۰، ۱۳۹۳.

[18]. Marefat, M. S. Ghahremani-Gargary, E. and Ataei, Sh. “load test of a plain concrete arch railway bridge of 20-m span”, construction and bbuilding materials, no.18, pp. 661 – 667, 2004.

[۱۹]. معرفت، محمدصادق، عطایی، شروان، قهرمانی گرگری، اسماعیل. "آزمایش استاتیک و دینامیک پل قوسی بتنی اکبرآباد"، نشریه دانشکده فنی، شماره ۱، صفحه ۱۳- ۲۵، ۱۳۸۲.

[۲۰]. معرفت، محمدصادق. "آزمایش بارگذاری پل‌های قوسی بتنی غیرمسلح"، گزارش مرکز تحقیقات راه‌آهن، ۱۳۷۹.

[21]. Bayraktar, A. Turker, T. Althnisik, F. " Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges", Construction and Building Materials, 75: 234-241, 2015.

[22]. Brencich, A. and Francesco, U.D. "Assessment of Multi-ispan Masonry Arch Bridges. I: Simplified Approach", Jourbal of bridge engineering, 9(6): 582-590, 2004.

Assessment of Effects of the Number of Spans on Static Capacity of Six-Meter Plain Concrete Arch Bridges

M. Yazdani *

PhD Candidate in structural engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

M.S. Marefat

Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

There are a large number of old arch bridges in Iran designed to carry the service loads that have been increased in the past decades. Capacity assessment of these bridges has become a vital need. Due to their complex behavior, essential field and loading tests are required. An accurate and appropriate modeling of these types of bridges was the first key paid attention to, in this research. Parameters such as number, length and geometry of spans and strength of materials are the most significant features to achieve this goal. Field load testing of old railway bridge in km–24 of Tehran–Qom railway have revealed important characteristics of the bridge such as primary stiffness, rigidity and pattern of fraction. The bridge is a plain concrete arch with five identical six-meter spans. The effect of number of spans on the yielding strength of the bridge has been carried out using ANSYS software. Based on the results obtained, a plain concrete arch bridge with a single span has a totally different behavior with the multi span ones. Also it has been revealed that bridges with more number of spans have less yielding strength and higher amount of crown displacement value. At last, novel relations for computing the yield strength and displacement value of six-meter span plain concrete bridges have been suggested.

Keywords: Plain concrete arch bridges, finite element modeling, effect of spans, yield strength of railway arch bridges.

*Corresponding Author: m.yazdani@ut.ac.ir