

## سنجش سلامت و ارزیابی کیفیت اجرای عرشه پل های بتنی چند دهانه به کمک تست مودال

رضا اکبری - معاون اداره کل نگهداری راه و ابنیه، سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای



### چکیده

در این مقاله، نتایج آزمایش‌های مودال بر روی یک پل بتنی هشت دهانه ۲۴۴ متری با عرشه تیر و دال که به صورت دهانه به دهانه و به طور مجزا آزمایش شده است گزارش می‌شود. این آزمون‌ها به منظور مقایسه مشخصات دینامیکی هر دهانه با سایر دهانه‌ها انجام شده است و ارزیابی مناسبی از سلامت عملکرد عرشه و کیفیت اجرای هر دهانه و کل عرشه پل را ارائه می‌نماید. همچنین، نتایج آزمایش توسط مدل اجزای محدود نیز باز تولید شده است. نتایج نشان می‌دهد به کمک آزمون‌های ارتعاش محیطی به سادگی می‌توان بصورت توأمان رفتار کلی سازه و کیفیت اجرا را به صورت کمی و کیفی ارزیابی نمود و عملکرد پیمانکار و حتی طراح سازه را مورد بررسی قرار داد.

**واژه‌های کلیدی:** مشخصات دینامیکی، ارتعاش محیطی، کیفیت اجرایی، پل‌های بتنی.

### ۱- مقدمه

یکی از موضوعات مورد علاقه محققین و مهندسين در طراحی و اجرای پل‌ها، نحوه عملکرد دینامیکی آن‌ها می‌باشد. عملکرد دینامیکی پل‌ها به هندسه طولی و عرضی پل، مقاومت مصالح و شرایط مرزی آن وابسته است. اساساً شرایط مرزی تأثیر شناخته شده و مشخصی در مشخصات دینامیکی سازه‌ها دارند، اما تأثیر هندسه طولی و عرضی و مشخصات مصالح کمی متفاوت است و تغییر در این کمیت‌ها تأثیرات متفاوتی در مشخصات دینامیکی پل‌ها خواهد داشت. به طور کلی در نظارت‌های فنی، کنترل

همزمان هندسه اجرا شده پل و مشخصات مصالح بکار رفته در آن و به طور کلی عملکرد واقعی سازه، متداول نمی‌باشد. چراکه معمولاً ابزارهای رایج جهت کنترل کیفیت سازه‌ها تنها برای کنترل کیفیت اجزای محدودی از سازه کاربرد دارند. به طور نمونه می‌توان به برخی از این ابزارهای کنترلی مانند آزمون‌های غیر مخرب برای تعیین مشخصات مصالح [۱-۳] و همچنین ابزارهای ساده برای تعیین ابعاد هندسی سازه اشاره نمود. بنابراین ملاحظه می‌گردد که مهندسين تنها قادر به ارزیابی ناپیوسته‌ای از کیفیت اجزا سازه می‌باشند و ارزیابی رفتار کلی و تطابق هندسه و مصالح اجرا شده با مشخصات کلی نقشه‌های طراحی، به وسیله ابزارها و آزمون‌های متداول فعلی امکان‌پذیر نیست. امروزه آزمون‌های دینامیکی، روشی شناخته شده برای تعیین مشخصات دینامیکی سازه‌ها می‌باشد که در سال‌های اخیر برای سازه‌های زیادی بکار رفته است [۴-۶]. این آزمون‌ها با هدف شناسایی کمیت‌های دینامیکی سازه و یا ارزیابی سازه آسیب‌دیده صورت می‌گیرد و به طور معمول برای کنترل کیفیت اجرایی یک سازه جدید الحداث بکار نمی‌رود. این مقاله نشان می‌دهد، با کمک انجام آزمون‌های دینامیکی از نوع ارتعاش محیطی به سادگی می‌توان کیفیت اجرای برخی پل‌های بتنی را به صورت نسبی ارزیابی نمود و کیفیت اجرای سازه را سنجید.

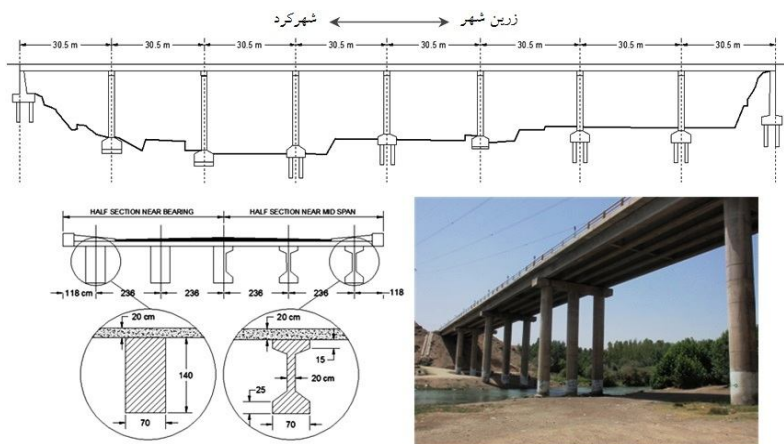
## ۲- معرفی پل مورد مطالعه

در فاصله ۷۰ کیلومتری جنوب غربی اصفهان و در مسیر زرین‌شهر - شهرکرد یکی از بزرگ‌ترین پل‌های احداث شده بر روی رودخانه زاینده‌رود با طول ۲۴۴ متر متشکل از عرشه تیر و دال بتنی قرار گرفته است و به «پل غدیر» شهرت دارد. عرشه پل با عرضی معادل ۱۱/۸ متر، از ۸ دهانه با تکیه‌گاه ساده و عیناً مشابه یکدیگر تشکیل شده است. هر دهانه از این پل از هر دو طرف به کمک درز انقطاع از دهانه دیگر جدا شده است. سیستم باربر عرشه متشکل از ۵ تیر بتنی پیش‌ساخته از نوع پیش تنیده I شکل است و طولی معادل ۳۰/۵ متر دارد. این پل در مجموع دارای ۷ پایه میانی است. هر پایه از این پل متشکل از ۳ ستون دایروی به قطر ۱/۶۰ متر می‌باشد و فاصله محور به محور ستون‌های آن از یکدیگر نیز ۴/۱ متر است. ارتفاع پل از روی عرشه تا روی فونداسیون در پایه‌های مختلف متفاوت است به طوری که کمترین مقدار آن در حدود ۱۳ متر و بیش‌ترین آن در حدود ۱۹ متر است. سر ستون در هر پایه متشکل از یک مقطع مستطیل شکل به ابعاد ۱/۶۸x۱ متر است که عرضی معادل عرض عرشه دارد. شکل (۱) مشخصات هندسی و تصویری از پل مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در شکل (۲) نیز مشخصات تکیه‌گاه‌های الاستومری پل نشان داده شده است. با توجه به نقشه‌های پل، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی بتن مورد استفاده در تیرهای پیش‌ساخته عرشه پل برابر با ۴۵ مگاپاسکال، در دال بتنی ۳۰ مگاپاسکال و در زیر سازه پل برابر با ۲۵ مگاپاسکال است.

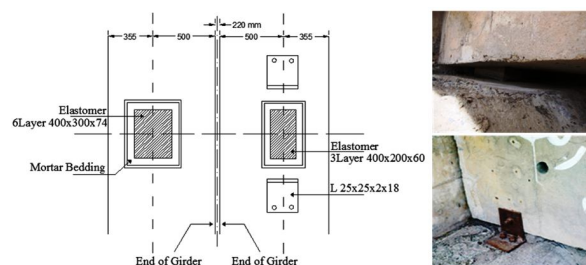
## ۳- روش تحقیق

این پل با هشت دهانه کاملاً مشابه و مجزا فرصت مناسبی را فراهم می‌آورد تا به امکان استفاده از آزمون‌های مودال برای کنترل کیفیت اجرای پل‌ها پی‌ببریم. با توجه به آنکه در شرایط مرزی مشابه، مشخصات دینامیکی عرشه هر دهانه متأثر از هندسه و مشخصات مصالح بکار رفته در آن است، می‌توان در صورت تشابه مشخصات دینامیکی هر دهانه از سازه با دهانه‌های دیگر و همچنین تشابه

نتایج انجام آزمون‌های مودال با نتایج مدل اجزا محدود به صحت کیفیت اجرای سازه و تطابق آن با نقشه‌های طراحی پی برد. بنابراین در این تحقیق مقرر گردید هر دهانه از پل بطور مجزا با استفاده از آزمون‌های ارتعاش محیطی مورد آزمون قرار گیرد و نتایج به دست آمده از هر دهانه با نتایج دهانه‌های مشابه دیگر و مدل اجزا محدود که مبتنی بر نقشه‌های طراحی است مقایسه گردد.



شکل (۱): مشخصات هندسی پل مورد مطالعه

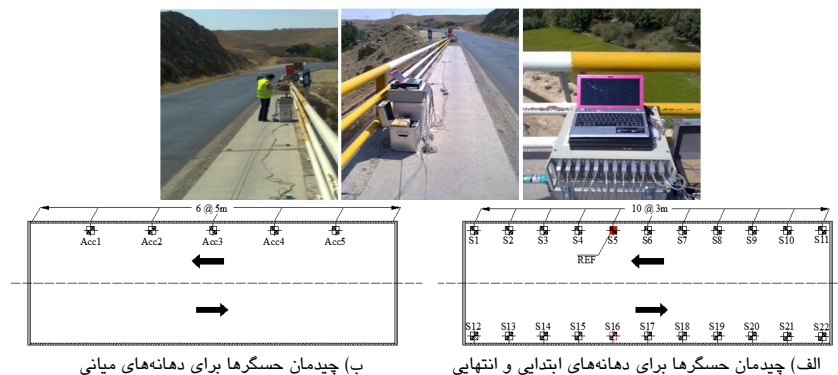


شکل (۲): شرایط تکیه‌گاهی هر دهانه از پل

#### ع- جزئیات انجام آزمایش‌ها

با توجه به اهداف در نظر گرفته شده برای تحقیق، آزمایش‌های مودال تجربی بر روی هر دهانه از پل به صورت مستقل صورت پذیرفت. شکل (۳) تصویری از مراحل انجام این آزمون‌ها را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش مودال، از یک دستگاه دیتالاگر ۳۶ کاناله دینامیکی و ۱۲ عدد شتاب‌سنج سه مؤلفه‌ای با دقت  $0.001 g$  استفاده شد. به منظور دقت در تعیین اشکال مودی لازم بود حداقل یک دهانه با حساسیت بالا و به صورت متقارن حسگر گذاری شود. برای دهانه‌های انتهایی این پل که دسترسی مناسب‌تری برای عبور کابل‌ها از زیر دهانه وجود داشت از دو چیدمان متقارن نسبت به محور طولی عرشه و با در نظر گرفتن یک شتاب‌سنج مرجع استفاده شد ولی برای آزمایش دهانه‌های میانی از

چیدمان یکطرفه استفاده گردید. شکل (۳) چگونگی قرارگیری حسگرها برای هر دهانه را نشان می‌دهند.

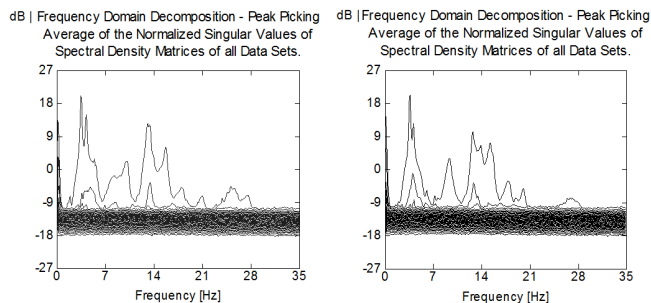


شکل (۳): مراحل انجام آزمایش‌ها و نحوه چیدمان حسگرها

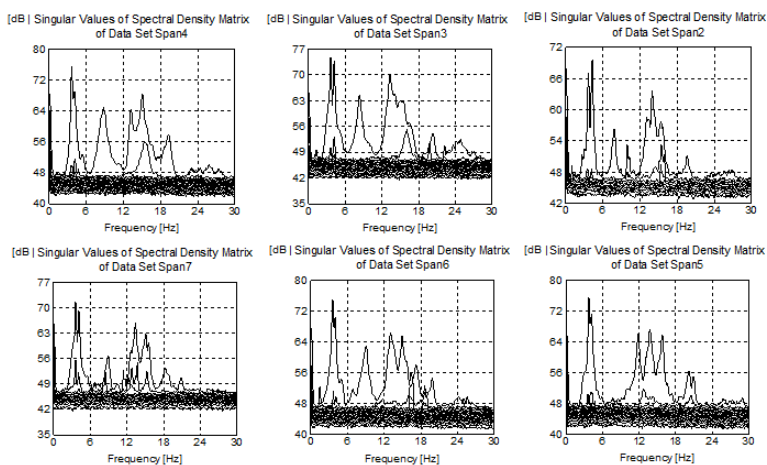
به منظور افزایش دقت در تعیین ضرایب میرایی به‌خصوص در فرکانس‌های پایین، مدت زمان نمونه‌برداری در هر چیدمان ۲۵ دقیقه تعیین شد. این مدت زمان تقریباً برابر با ۳۰۰۰ برابر زمان تناوب احتمالی مود اول سازه در نظر گرفته شد. همچنین به منظور ثبت ارتعاشات ضعیف پل و جلوگیری از تداخل فرکانسی، نرخ نمونه‌برداری در هر کانال ۲۰۰ هرتز منظور گردید. لازم به ذکر است، در طول مدت زمان آزمایش خللی در حرکت وسایل نقلیه عبوری از پل صورت نپذیرفت و پل در شرایط عادی بهره‌برداری قرار داشت.

## ۵- نتایج آزمایش‌ها و مدل سازی اجزای محدود

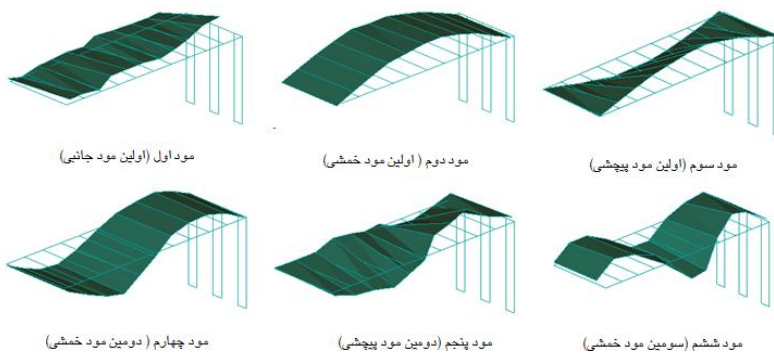
برای هر دهانه، نمودارهای تجزیه فرکانسی داده‌های آزمایش توسط نرم‌افزار "ARTEMIS Extractor" [۷] ترسیم گردید. به منظور تفکیک فرکانسی بهتر در این ترسیم‌ها از بلوک‌های ۱۰۲۴ نقطه‌ای با ۶۶/۷ درصد همپوشانی استفاده شد. اشکال (۴) و (۵) چگونگی این ترسیم‌ها را نشان می‌دهند. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها بر روی عرشه پل، به روش تجزیه در حوزه فرکانس و مقادیر میرایی متناظر هر مود به روش تجزیه در حوزه فرکانس بهبودیافته استخراج و در جدول (۱) ارائه شده است. شکل (۶) اشکال مودی حاصل از آزمایش بر روی دهانه ابتدایی پل (دهانه سمت شهرکرد) را نشان می‌دهد. این اشکال برای دهانه‌های دیگر پل نیز صادق است. در ادامه، مدل اجزای محدود این پل بر اساس نقشه‌های طراحی و مفروضات مشخصات مصالح مندرج بر روی نقشه‌های طراحی در محیط "SAP۲۰۰۰" تهیه شد. شرایط مرزی این مدل همانند وضعیت موجود در نظر گرفته شدند و سختی عناصر تکیه‌گاهی (بالشتک‌های الاستومری) آن‌ها مطابق روابط موجود در کتب و مقالات فنی [۱ و ۴] محاسبه گردید و مقادیر عددی آن‌ها به صورت فنرهای خطی مدل‌سازی شدند. نتایج تحلیل این مدل نیز در جدول (۱) ارائه شده است. شکل (۷) اشکال مودی متناظر با این مدل را نشان می‌دهد. این اشکال برای دهانه‌های دیگر پل نیز صادق است.



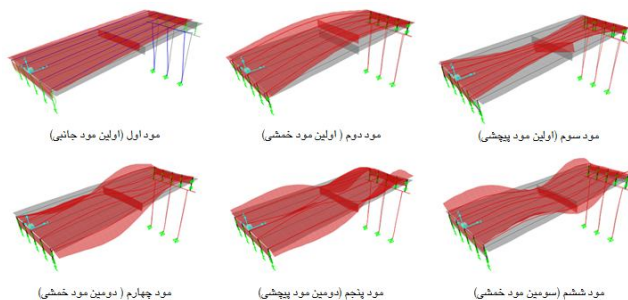
شکل (۴): نمودارهای تجزیه فرکانسی داده‌های آزمایش مربوط به دهانه ابتدایی و دهانه انتهایی پل  
شکل سمت راست: نمودار مربوط به دهانه اول از سمت شهرکرد؛ شکل سمت چپ: نمودار مربوط به دهانه آخر از سمت شهرکرد



شکل (۵): نمودارهای تجزیه فرکانسی داده‌های آزمایش، مربوط به دهانه‌های دوم تا هفتم پل



شکل (۶): اشکال مودی حاصل از آزمایش بر روی دهانه ابتدایی پل



شکل (۷): اشکل مودی حاصل از مدل اجزای محدود

جدول (۱): مقادیر فرکانسهای طبیعی و درصد میرایی حاصل از آزمایش و نتایج مدل اجزا محدود

مشخصات دینامیکی هر دهانه	حد اکثر اختلاف (%)	ضریب تغییرات (%)	دهانه	دهانه	دهانه	دهانه	دهانه	دهانه	دهانه	دهانه		
			اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم		
مود اول (اولین مود جانبی)	فرکانس آزمایش (Hz)	۱۷۲۳	۱/۹۵	۱/۲۷	۱/۲۷	۱/۲۷	۱/۵۶	۱/۴۶	۱/۵۶	۱/۸۵	+۵۲/۵	-
	میرایی (%)	-	۳۷۰۰۲	۱۷/۲۱	۷۷۷۷	۵۶/۶۱	۴۲۵۴	۶۰۷۴	۴۳۶۲	۶۸/۱۶	-	-
	فرکانس مدل اجزا محدود (Hz)	۸۸۵	۱/۴۳	۱/۱۲	۱/۱۰	۱/۱۷	۱/۲۱	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۳۳	+۳۷/۰	۸۸۵
مود دوم (اولین مود خمشی)	فرکانس آزمایش (Hz)	۲۵۶	۳/۵۱	۳/۶۱	۳/۶۱	۳/۶۱	۳/۷۱	۳/۵۱	۳/۶۱	۳/۴۱	+۸/۷	-
	میرایی (%)	-	۱/۹۳۱	۱/۸۱۷	۱/۳۸۰	۱/۵۶۵	۱/۵۳۱	۱/۵۶۰	۱/۸۲۲	۱/۹۱۵	-	-
	فرکانس مدل اجزا محدود (Hz)	۱/۲۷	۳/۶۰	۳/۴۷	۳/۴۶	۳/۴۷	۳/۴۸	۳/۴۸	۳/۴۸	۳/۴۹	+۴/۲	۱/۲۷
مود سوم (اولین مود پیچشی)	فرکانس آزمایش (Hz)	۱/۶۸	۴/۱۰	۴/۱۹	۴/۱۹	۴/۱۰	۴/۱۹	۴/۰۰	۴/۱۰	۴/۱۹	+۴/۷	-
	میرایی (%)	-	۲/۱۵۲	۲/۱۴۵	۱/۷۵۳	۱/۵۷۲	۱/۵۳۳	۱/۵۶۵	۱/۵۶۶	۲/۵۳۱	-	-
	فرکانس مدل اجزا محدود (Hz)	۱/۷۲	۴/۰۱	۳/۸۲	۳/۸۱	۳/۸۳	۳/۸۳	۳/۸۲	۳/۸۲	۳/۸۴	+۵/۲	۱/۷۲
مود چهارم (دومین مود خمشی)	فرکانس آزمایش (Hz)	۲/۰۷	۱۵/۲۳	۱۵/۰۴	۱۵/۴۳	۱۵/۰۴	۱۵/۸۲	۱۵/۹۴	۱۵/۰۴	۱۵/۶۳	+۵/۸	-
	میرایی (%)	-	۱/۶۲۷	۱/۵۰۷	۲/۵۲۵	۱/۱۶۲	۲/۴۱۸	۱/۷۴۲	۱/۳۲۲	۲/۲۰۲	-	-
	فرکانس مدل اجزا محدود (Hz)	۱/۵۳	۱۵/۰۹	۱۵/۰۱	۱۴/۹۰	۱۴/۷۴	۱۴/۴۹	۱۴/۵۶	۱۴/۵۶	۱۴/۹۰	+۲/۳	۱/۵۳
مود پنجم (دومین مود پیچشی)	فرکانس آزمایش (Hz)	۳/۱۱	۲۷/۰۲	۱۹/۳۴	۲۷/۳۱	۱۹/۲۴	۲۷/۲۱	۱۹/۸۲	۲۷/۹	۲۷/۹	+۸/۶	-
	میرایی (%)	-	۱/۴۳۰	۱/۸۱۹	۱/۹۳۷	۲/۸۷۳	۱/۰۹۱	۱/۷۱۴	۱/۳۰۹	۱/۴۶۸	-	-
	فرکانس مدل اجزا محدود (Hz)	۷/۱۰	۱۹/۱۹	۱۹/۱۷	۱۹/۱۷	۱۹/۱۸	۱۹/۱۸	۱۹/۱۴	۱۹/۱۴	۱۹/۱۴	+۷/۲	۷/۱۰
مود ششم (سومین مود خمشی)	فرکانس آزمایش (Hz)	۲/۷۶	۲۷/۳۷	۲۵/۲	۲۴/۹	۲۵/۷۸	۲۵/۹۸	۲۴/۱۲	۲۵/۲۹	۲۵/۱	+۹/۳	-
	میرایی (%)	-	۱/۷۵۷	۱/۴۱۶	۳/۵۷۲	۱/۸۶۲	۱/۹۱۰	۱/۳۴۶	۱/۲۸۲	۱/۶۸۶	-	-
	فرکانس مدل اجزا محدود (Hz)	۱/۶۱	۲۷/۷۳	۲۱/۹۹	۲۱/۸۶	۲۲/۰۷	۲۲/۲۶	۲۲/۳۴	۲۲/۳۴	۲۲/۸۷	+۴/۶	۱/۶۱

## ۶- تحلیل نتایج

متناسب با اهداف تحقیق دو سؤال در خصوص نتایج انجام آزمون‌ها وجود دارد. اول آنکه هندسه و مصالح بکار رفته در هر دهانه تا چه اندازه مشابه دهانه دیگر است یا به عبارتی نحوه عملیات اجرایی پیمانکار تا چه اندازه همگن بوده است. سؤال دوم آنکه هندسه و مصالح اجرا شده تا چه اندازه منطبق بر نقشه‌های طراحی است. برای پاسخ به این دو سؤال، مقادیر نتایج به دست آمده در جدول (۱) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد بیشترین مقدار میرایی مودال حاصل از هر دهانه، غالباً مربوط به مود جانبی عرشه است. وجود میرایی بالا در این مود بیانگر لقی اتصال عرشه به سر ستون و یا ترک در پایه‌ها می‌باشد. هرچند که در زمان آزمایش بازدیدهای بصری تقریباً سلامت اکثر پایه‌های پل را تأیید می‌نمود اما وجود ترک‌های سطحی در برخی از پایه‌ها نیز مشهود بود. نتایج جدول (۱) برای مودهای شناسایی شده عرشه نشان می‌دهد در تمامی دهانه‌ها میرایی مودی عرشه پل کمتر از ۵ درصد است. این موضوع در کنار پیوستگی اشکال مودی حاصله نشان می‌دهد، علی‌رغم گذشت بیش از دو دهه از عمر پل، هنوز آثاری از استهلاک انرژی بالا به دلیل وجود ترک‌ها، لقی اتصالات و ... در عرشه پل وجود ندارد. بازدیدهای بصری از اجزای عرشه نیز سلامت ظاهری اجزای آن در هر دهانه را تأیید می‌نماید.

نتایج جدول (۱) برای دهانه‌های مختلف نشان می‌دهد در مود جانبی عرشه (مود اول)، اختلاف میان مقادیر فرکانس در دهانه‌های مختلف نسبت به یکدیگر زیاد است. بطوریکه حداکثر اختلاف به دست آمده در این مود برابر ۵۳/۵ درصد است. هرچند که مقادیر میرایی به دست آمده در مورد پایه‌های هر دهانه نشان از وجود استهلاک بالا و احتمالاً ترک‌خوردگی در این المان‌ها را گوشزد می‌نماید، اما به نظر می‌رسد اختلاف مقادیر فرکانس بیشتر به دلیل اختلاف ارتفاع پایه‌هاست. در جدول (۱) اختلاف مقادیر فرکانس در مدل اجزا محدود برای دهانه‌های مختلف در این مود نیز این موضوع را تأیید می‌نماید. این اختلاف در دهانه‌های مختلف عرشه متفاوت بوده و بین ۸/۵ تا ۳۹ درصد متغیر است. وجود این اختلاف مربوط به سختی بیشتر پایه‌ها و اتصالات اجرا شده در پل نسبت به مدل اجزا محدود است که می‌تواند به سبب افزایش مقاومت بتن بکاررفته در سازه نسبت به مدل اجزا محدود و یا سختی جانبی ناشی از پر شدن درزهای انقطاع باشد.

جدول (۱) نتایج به دست آمده برای مودهای خمشی و پیچشی عرشه را نیز به صورت دهانه به دهانه نشان می‌دهد. با مقایسه مقادیر فرکانس‌های طبیعی به دست آمده برای هر دهانه نسبت به دهانه‌های دیگر ملاحظه می‌گردد، اختلاف مقادیر فرکانس میان مودهای همنام دهانه‌های مختلف پل بسیار اندک است، به طوری که حداکثر اختلاف به دست آمده مربوط به اختلاف میان دهانه‌های اول و ششم و برابر با ۹/۳ درصد است که در مود سوم خمشی رخ داده است. همچنین حداکثر ضریب تغییرات آزمایش‌های مودال که بیانگر پراکندگی نتایج هر ۸ دهانه در هر مود نسبت به مقدار میانگین آن مود است برابر با ۵/۹ درصد می‌باشد که این مقدار در مودهای شناسایی شده عرشه برابر ۳/۱ درصد است. این موضوع یعنی پراکندگی اندک مقادیر فرکانس در کنار میرایی کمتر از ۵ درصدی تمامی مودهای هر ۸ دهانه از عرشه نشان می‌دهد، اولاً هر ۸ دهانه از عرشه پل دارای هندسه و مصالح بکار رفته نسبتاً یکسان است و پیمانکار اجرایی سازه، هر ۸ دهانه را به صورت همگن اجرا نموده است. ثانیاً در طول عمر بهره‌برداری از این دهانه‌ها اتفاقی در جهت کاهش سختی هر دهانه از قبیل وجود

ترک و ... رخ نداده است.

## ۷- نتیجه

مقایسه نتایج مشخصات دینامیکی حاصل از آزمایش مودال و مدل اجزای محدود بر روی این پل که دارای ۸ دهانه مشابه و مستقل از یکدیگر است نشان داد، حداکثر اختلاف میان مشخصات مودال این هشت دهانه در مودهای دینامیکی عرشه بسیار اندک و در حد قابل قبولی است، به طوری که حداکثر اختلاف فرکانسی میان آزمون‌های مودال این دهانه‌ها در مودهای عرشه برابر ۹/۳ درصد است. این اختلاف اندک در کنار مقادیر میرایی به دست آمده از مودهای عرشه که در سطح کمتر از ۵ درصد است نشان از سلامت عملکردی آن و کیفیت مناسب عملیات اجرایی پیمانکار پل است. از طرفی مقایسه نتایج آزمون‌های مودال با مدل اجزا محدود هر دهانه که منطبق بر نقشه‌های طراحی است نشان داد، حداکثر اختلاف میان نتایج فرکانسی مدل اجزا محدود و آزمایش‌های مودال در حدود ۱۳/۶ درصد است که این موضوع بیانگر تطابق مناسب عملیات اجرایی پیمانکار با نقشه‌های طراحی می‌باشد. همچنین نتایج انجام آزمون‌ها برای عرشه پل نشان داد که در تمامی دهانه‌ها مقادیر میرایی حاصله کمتر از ۵ درصد است. این موضوع با توجه به اختلاف ناچیز فرکانسی میان مشخصات مودال دهانه‌ها بیانگر سلامت عملکردی عرشه پس از گذشت دو دهه از عمر مفید خود می‌باشد، هرچند که در خصوص پایه‌های پل وجود مقادیر میرایی بیش از ۵ درصد و وجود ترک‌های سطحی در برخی از پایه‌ها سلامت عملکرد پایه‌ها را مورد تردید قرار می‌دهد. در مجموع این تحقیق نشان داد که برای برخی از سازه‌ها با استفاده از آزمون‌های مودال تجربی می‌توان نحوه عملکرد اجرایی پیمانکار، طراح، مقاومت مصالح و شرایط هندسی سازه را به صورت توأمان مورد بررسی قرار داد. همچنین با توجه به آنکه این نوع از آزمون‌ها در شرایط واقعی سازه صورت می‌پذیرد، اعتبار آن بیش از آزمون‌های متداول نظارتی است که تنها جزء محدودی از سازه را کنترل می‌نمایند.

## ۸- مراجع

- [۱] Akbari, R.; and Maalek, S.; "Evaluation of the shear modulus of elastomeric bridge bearings using modal data"; Journal of Testing and Evaluation; ۳۷ (۲), ۲۰۰۹, ۱۵۰-۱۵۹.
- [۲] Prakash Rao, D. S.; "Investigations on ancient masonry structures using infrared thermography"; Inframation -۲۰۰۷ Proceedings; ۲۰۰۷.
- [۳] Wenzel, H.; "Health Monitoring of Bridges"; John Wiley & Sons, Ltd; ۲۰۰۹.
- [۴] Maalek, S.; Akbari, R.; and Ziaei-Rad, S.; "The effects of the repair operations and replacement of the elastomeric bearings on the modal characteristics of a highway bridge" Structure and Infrastructure Engineering; ۶(۶), ۲۰۱۰, ۷۵۳-۷۶۵.
- [۵] Ceravolo, R.; and Abbiati, G.; "Time domain identification of structures: Comparative analysis of output-only methods"; Journal of Engineering Mechanics; ۱۳۹(۴), ۲۰۱۳, ۵۳۷-۵۴۴.
- [۶] Le, T. P.; and Paultre, P.; "Modal identification based on the time-frequency domain decomposition of unknown-input dynamic tests"; International Journal of Mechanical Sciences; ۷۱, ۲۰۱۳, ۴۱-۵۰.
- [۷] Structural vibrations solutions; "ARTEMIS Extractor pro ۳.۴۳"; ۱۹۹۹-۲۰۰۴.