

# مقایسه فرکانس‌های ارتعاشی پل‌های تیر و دال بتنی به روش‌های تئوری و تجربی

سعید معدنی<sup>۱\*</sup>، رضا اکبری<sup>۱</sup>، شاهرخ مالک<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات اصفهان

۲- پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران،

S\_maadani@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۰۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۱۳

**چکیده** - در این پژوهش، مشخصات دینامیکی دو پل بزرگراهی متشکل از عرشه تیر و دال بتنی (دارای هندسه مشابه ولی با شرایط مرزی و محیطی متفاوت) با انجام چندین آزمایش ارتعاش محیطی استخراج شده و نتایج آن بررسی و مقایسه شده است. همچنین، از آنجا که پل‌های بررسی شده روی رودخانه احداث شده‌اند، به کمک نتایج حاصل از انجام آزمایش مودال، اثر فصلی بودن رودخانه و حضور/عدم حضور آب در بستر رودخانه بر کمیت‌های دینامیکی یکی از این پل‌ها که اتصال عرشه به کوله و پایه‌های آن به صورت پیوسته است، در دو بازه زمانی متفاوت یعنی زمان خشکی و زمان پرآبی رودخانه، بررسی شده است. به منظور مقایسه شهودی میزان گیرداری و تغییر شکل‌های اتصال پیوسته عرشه به پایه در این نوع پل‌ها، جابه‌جایی‌های واقعی عرشه، در نزدیک مرز محل اتصال به پایه، اندازه‌گیری و با مدل تحلیلی مقایسه می‌شود. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، شرایط مرزی در تکیه‌گاه‌های عرشه (مانند صلبیت خمشی اتصال عرشه به پایه و کوله و یا وجود بالشتک‌های الاستومری)، تأثیر قابل توجهی در تغییر فرکانس ارتعاشی مودهای سازه به ویژه مودهای اول خمشی و پیچشی دارد. همچنین غرق شدن پایه‌ها در آب نیز موجب تغییرات ناچیز در مقادیر فرکانس‌های ارتعاشی و تغییرات بیشتری در مقادیر میرایی سازه می‌شود.

**واژگان کلیدی:** مشخصات دینامیکی، ارتعاش محیطی، شرایط مرزی، پل‌های بتنی.

## ۱- مقدمه

عرشه تا چه اندازه به حالت نظری آن نزدیک است. در این خصوص تغییر در شرایط مرزی تکیه‌گاه‌ها منجر به تغییر در مشخصات دینامیکی سازه می‌شود. در حال حاضر مطالعات مختلفی در خصوص تأثیر شرایط مرزی بر خصوصیات دینامیکی پل‌ها صورت گرفته است که بخش عمده‌ای از این مطالعات مربوط به بررسی اثر تغییر در مشخصات سختی تکیه‌گاه‌های ساده عرشه است. نتایج مطالعات

یکی از نگرانی‌های مهندسين در طراحی و اجرای پل‌ها، چگونگی عملکرد دینامیکی آن‌ها به ویژه عملکرد تکیه‌گاه پل‌ها است. این موضوع در اتصالات صلب تکیه‌گاه عرشه به کوله و پایه‌ها اهمیت بیشتری دارد، چرا که به طور قطعی در عمل مشخص نیست میزان گیرداری (صلبیت) فرض شده در زمان طراحی در تکیه‌گاه‌ها و اتصالات پیوسته

تغییر مشخصات دینامیکی یکی از این پل‌ها نیز بررسی شده است. لازم به ذکر است آزمون‌های دینامیکی روی این پل‌ها به طریق آزمایش مودال ارتعاشات محیطی صورت گرفته است و به استناد اینکه این روش، روش شناخته‌شده‌ای نزد متخصصان مهندسی پل و دینامیک سازه است، از ذکر جزئیات مرتبط خودداری می‌شود. البته شرح این روش‌ها در کتب و مقالات متعددی از جمله مراجع [۶-۸] وجود دارد.

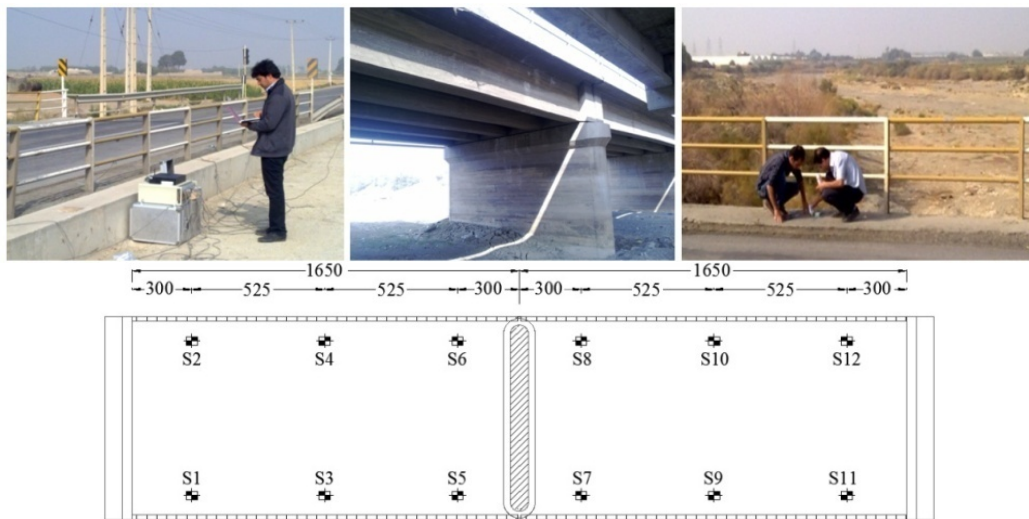
## ۲- معرفی پل‌های مورد مطالعه

در ۳۳ کیلومتری شرق اصفهان در جاده اصفهان- زیار و بر روی رودخانه زاینده‌رود، دو دستگاه پل متشکل از عرشه تیر و دال بتنی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. هر یک از این پل‌ها دارای دو دهانه است که طول دهانه در آن‌ها یکسان است. یکی از این پل‌ها، پل جدیدی است که در مسیر رفت به سمت زیار قرار دارد و در این مقاله "پل جدید" نامیده خواهد شد. پل دوم در مسیر برگشت در همین جاده ساخته شده است و از آن در این مقاله بنام "پل قدیمی" یاد می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، عرشه پل قدیمی متشکل از دو دهانه ساده است که به کمک تکیه‌گاه‌های الاستومری روی کوله و یک پایه وسط قرار گرفته است، اما برای پرهیز از مشکلات نگهداری به خصوص در مورد درزهای انبساط، عرشه پل جدید به صورت دهانه پیوسته و با اتصال پیوسته شاهرها با پایه و کوله‌ها (به صورت دهانه قابی شکل) ساخته شده است. صرف‌نظر از تفاوت در شرایط تکیه‌گاهی دو سازه، هر دو پل دارای طول دهانه یکسان و موقعیت مکانی مانندی است. شکل (۲) مشخصات هندسی پل جدید و شکل (۳) مشخصات هندسی پل قدیمی را نشان می‌دهد.

Mertlich و همکاران (۲۰۰۷) روی یک پل قوسی سه دهانه با عرشه تیر فولادی نشان می‌دهد که تغییر سختی در تکیه‌گاه‌های ساده این پل می‌تواند فرکانس‌های ارتعاشی را بیشینه ۳۴ درصد تغییر دهد [۱]. Fayyadh و همکاران (۲۰۱۱) نیز با مطالعه و انجام آزمایش مودال بر روی مشخصات مصالح تکیه‌گاه‌های ساده یک تیر بتنی دریافتند که فرکانس مودهای خمشی حساسیت زیادی نسبت به تغییرات سختی تکیه‌گاه‌ها دارند [۲]. مالک و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر تعویض تکیه‌گاه‌های الاستومری در مشخصات دینامیکی یک پل بزرگراهی را بررسی کردند [۳]. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌داد تعویض بالشتک‌های الاستومری کهنه باعث تغییر در فرکانس‌های طبیعی پل خواهد شد که در خصوص پل مورد بررسی به وسیله‌ی آن‌ها این افزایش تا ۱۵ درصد مشاهده شد. Carvajal و همکاران (۲۰۰۹) نیز با انجام آزمون‌های ارتعاش محیطی بر روی دو پل بتنی و فولادی با شرایط مرزی گیردار دریافتند که در مرز کوله، این پل‌ها می‌توانند بسیار آسیب‌پذیر باشند [۴]. در برخی دیگر از پژوهش‌ها، اثر شرایط محیطی شامل تغییرات سرعت باد، میزان ترافیک، درجه حرارت محیط و نظایر آن بر روی فرکانس‌های طبیعی پل‌ها به صورت مطالعات موردی گزارش شده است که در بین آن‌ها می‌توان به یکی از کارهای بزرگ انجام‌شده به وسیله‌ی Magalhães و همکاران (۲۰۰۹) اشاره کرد [۵].

در این مطالعه به کمک انجام آزمون‌های دینامیکی، اثر شرایط تکیه‌گاهی در مشخصات دینامیکی دو پل بتنی دو دهانه که دارای هندسه یکسان و شرایط مرزی متفاوت نسبت به یکدیگر است، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج این بررسی در این مقاله گزارش شده است. همچنین اثر فصلی بودن رودخانه (حضور/عدم حضور آب پیرامون پایه پل) بر





شکل (۴) چیدمان شتاب سنج‌ها و چگونگی انجام آزمایش مودال بر روی عرشه پل قدیمی (ابعاد به سانتی‌متر)

### ۳- جزئیات انجام آزمایش‌ها

#### ۳-۱- آزمایش پل قدیمی

با توجه به اهداف در نظر گرفته شده در این پژوهش، مرحله اول انجام آزمایش مودال تجربی در زمان خشکی رودخانه انجام پذیرفت. در این زمان، رودخانه زاینده رود حدود یک سال در فصل خشک‌سالی قرار داشت و عمق آب‌های زیرزمینی به فاصله بیش از ۱۰ متر از بستر رودخانه رسیده بود. در این مرحله از انجام آزمایش، از یک دستگاه دیتالاگر ۳۶ کاناله دینامیکی و ۱۲ عدد شتاب‌سنج سه مؤلفه‌ای با دقت  $\pm 0.001 g$  استفاده شد. مطابق شکل (۴)، برای اندازه‌گیری‌ها در هر دهانه از ۶ عدد شتاب‌سنج استفاده شد. برای افزایش دقت در تعیین ضرایب میرایی به خصوص در فرکانس‌های پایین، مدت زمان نمونه‌برداری در هر چیدمان ۳۰ دقیقه تعیین شد.

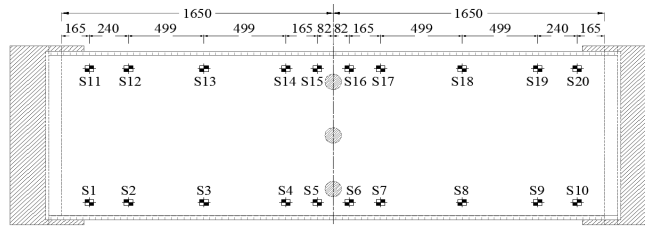
در این آزمایش‌ها برای ثبت ارتعاشات ضعیف پل و جلوگیری از تداخل فرکانسی، نرخ نمونه‌برداری در هر کانال ۲۰۰ هرتز منظور شد؛ در طول مدت زمان آزمایش خللی در حرکت و وسایط نقلیه عبوری از پل صورت نپذیرفت و پل در شرایط عادی بهره‌برداری قرار داشت.

#### ۳-۲- آزمایش پل جدید

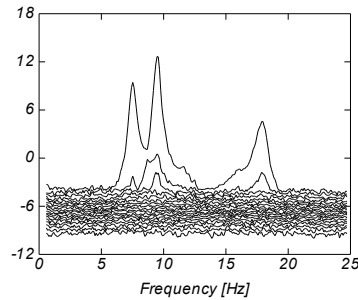
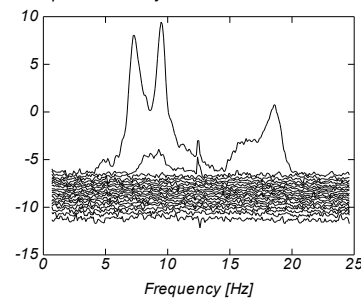
به طور مشخص، اهداف اصلی انجام آزمایش‌های دینامیکی روی عرشه پل جدید را می‌توان در مقایسه مشخصات دینامیکی پل جدید و قدیمی، بررسی اثر فصلی بودن رودخانه در تغییر مشخصات دینامیکی سازه و مطالعه رفتار واقعی سازه در تکیه‌گاه‌های گیردار عرشه به پایه خلاصه کرد. به این منظور، آزمایش‌ها بر روی عرشه پل جدید در دو مرحله صورت پذیرفت. مرحله اول هم‌زمان با انجام آزمایش روی پل قدیمی انجام شد. مرحله دوم آزمایش نیز در شرایطی انجام پذیرفت که رودخانه پس از حدود یک و نیم سال خشکی، دوباره پرآب شده بود. در هر دو آزمایش از ۱۰ عدد شتاب‌سنج سه مؤلفه‌ای در هر طرف عرشه استفاده شد. از آنجا که عرشه در اطراف پایه‌ها و کوله به صورت گیردار اجرا شده بود، فواصل قرارگیری شتاب‌سنج‌ها در نزدیکی پایه و کوله‌ها نزدیک‌تر از سایر نقاط تعیین شد تا رفتار واقعی تری از عرشه و چگونگی گیرداری آن‌ها بدست آید. شکل (۵) مراحل انجام آزمایش و چگونگی چیدمان حسگرها را نشان می‌دهد. در طول انجام هر آزمایش از حسگر شماره (۵) به عنوان حسگر مرجع استفاده شد.



الف) انجام آزمایش در نوبت اول (خشکی رودخانه) ب) انجام آزمایش در نوبت دوم (پرآبی رودخانه)



شکل (۵) چیدمان شتاب‌سنج‌ها و چگونگی انجام آزمایش بر روی پل جدید (ابعاد به سانتی‌متر)

dB | Frequency Domain Decomposition - Peak Picking  
Average of the Normalized Singular Values of  
Spectral Density Matrices of all Data Sets.dB | Frequency Domain Decomposition - Peak Picking  
Average of the Normalized Singular Values of  
Spectral Density Matrices of all Data Sets.

شکل (۶) نمودار تجزیه فرکانسی تمامی داده‌های آزمایش مربوط به هر دهانه از پل قدیمی. (سمت چپ: منحنی مربوط به دهانه اول از سمت اصفهان، سمت راست: منحنی مربوط به دهانه دوم از سمت اصفهان)

بهرتر در این رسم که به وسیله نرم‌افزار "ARTeMIS Extractor 3.43" [۹] صورت پذیرفته است، از بلوک‌های ۱۰۲۴ نقطه‌ای با ۶۶/۷ درصد همپوشانی استفاده شد. نتایج کمیت‌های مودال حاصل از این آزمایش و اشکال مودی متناظر با آن‌ها به ترتیب در جدول (۱) و شکل (۷) نمایش داده شده است. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار "SAP2000"، مدل اجزای محدود این پل بر اساس هندسه و مشخصات مصالح مندرج بر روی نقشه‌های طراحی تهیه شد. نتایج تحلیل مدل اجزای محدود در جدول (۱) و اشکال مودی متناظر با آن در شکل (۸) نشان داده شده است.

چگونگی ثبت داده‌ها نیز مشابه آزمایش روی پل قدیمی انجام شد. لازم به ذکر است در زمان انجام هر دو آزمایش، پل جدید هنوز بهره‌برداری نشده بود و برای تحریک آن از یک کامیون که به طور متوالی از روی پل عبور داده می‌شد بهره گرفته شد.

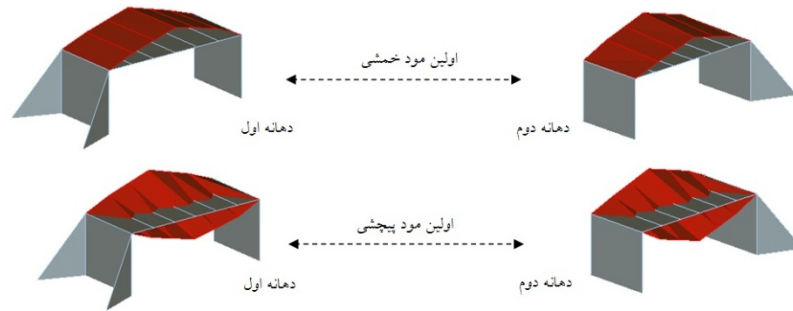
#### ۴- نتایج آزمایش و مدل‌سازی اجزای محدود

##### ۴-۱- نتایج آزمایش و مدل‌سازی اجزای محدود پل قدیمی

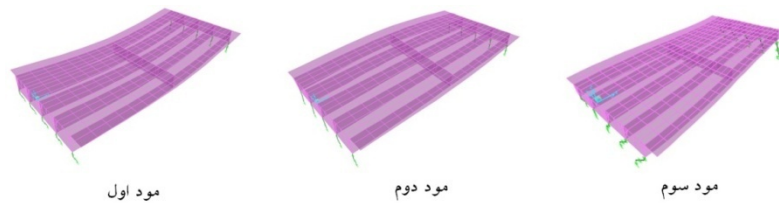
مطابق شکل (۶) نمودارهای تجزیه فرکانسی تمامی داده‌های آزمایش پل قدیمی رسم شد. برای تفکیک فرکانسی

جدول (۱) مشخصات دینامیکی حاصل از آزمایش مودال و مدل اجزای محدود پل قدیمی

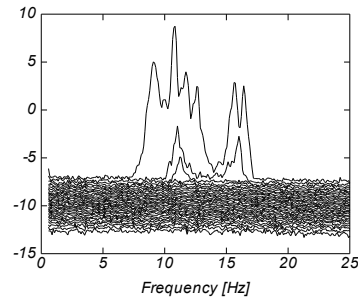
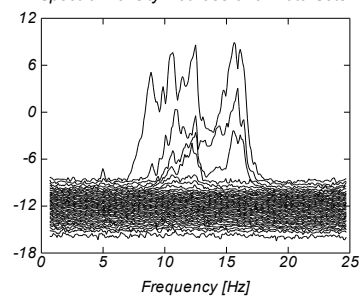
شماره مود	آزمایش دهانه دوم از سمت اصفهان		آزمایش دهانه اول از سمت اصفهان		اختلاف فرکانس از نتایج آزمایش (%)	نتایج فرکانسی در مدل اجزای محدود (Hz)	شکل مود
	فرکانس (Hz)	میرایی (%)	فرکانس (Hz)	میرایی (%)			
مود اول	۷/۳۸۵	۵/۵۴۸	۷/۵۳	۴/۵۷۸	۱/۹۲	۷/۶۶۵	اولین مود خمشی
مود دوم	۹/۹۴۲	۲/۷۹	۹/۴۸۹	۲/۷۰۵	-۰/۰۳	۹/۲۳۸	اولین مود پیچشی
مود سوم	۱۸/۴۶	۳/۷۴۹	۱۷/۸۲	۳/۴۶۶	-۳/۵۹	۱۷/۶۹۴	دومین مود پیچشی



شکل (۷) اشکال مودی حاصل از حرکات واقعی عرشه مربوط به آزمایش بر روی هر دهانه از عرشه پل قدیمی



شکل (۸) اشکال مودی بدست آمده از نتایج مدل اجزای محدود پل قدیمی

dB | Frequency Domain Decomposition - Peak Picking  
Average of the Normalized Singular Values of  
Spectral Density Matrices of all Data Sets.dB | Frequency Domain Decomposition - Peak Picking  
Average of the Normalized Singular Values of  
Spectral Density Matrices of all Data Sets.

الف) برداشت زمان خشکی رودخانه ب) برداشت در زمان پرابی رودخانه

شکل (۹) نمودار تجزیه فرکانسی تمامی داده‌های آزمایش مربوط به پل جدید

فرکانسی داده‌های آزمایش پل جدید را نشان می‌دهد. در این ترسیم نیز به منظور تفکیک فرکانسی بهتر، از بلوک‌های ۱۰۲۴ نقطه‌ای با ۶۶/۷ درصد همپوشانی استفاده شده است.

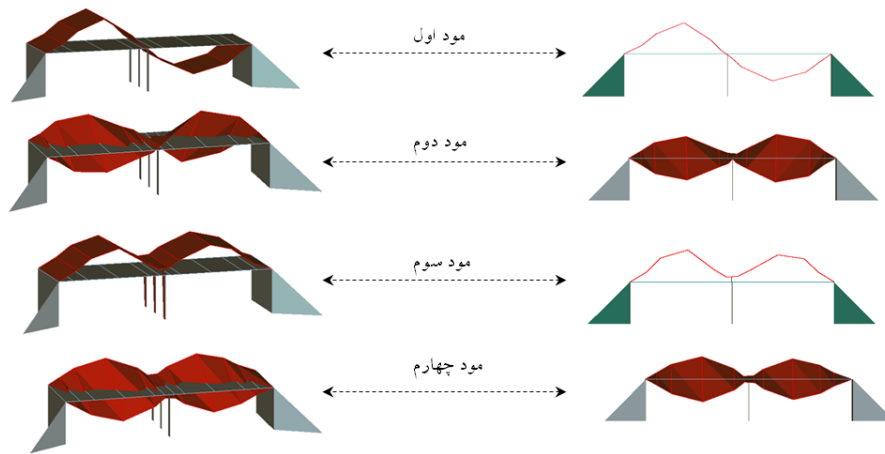
#### ۴-۲- نتایج آزمایش و مدل‌سازی اجزای محدود

##### پل جدید

شکل (۹) قله‌های فرکانسی حاصل از نمودارهای تجزیه

جدول (۲) مشخصات دینامیکی حاصل از آزمایش مودال و مدل اجزای محدود پل جدید

شماره مود	آزمایش در زمان خشکی رودخانه		آزمایش در زمان پرآبی رودخانه		نتایج آزمایش (%)		شکل مود در آزمایش و مدل تحلیلی
	فرکانس (Hz)	میرایی (%)	فرکانس (Hz)	میرایی (%)	فرکانس (Hz)	میرایی (%)	
مود اول	۸/۸۸۷	۵/۵۹۸	۹/۰۸۲	۸/۴۷۵	۲/۱۹۴	۸/۹۰۵	اولین مود خمشی
مود دوم	۱۰/۵۵	۱/۹۱۱	۱۰/۸۴	۱/۳۳۶	۲/۷۴۸	۹/۸۴۵	اولین مود پیچشی
مود سوم	۱۱/۴۳	۱/۷۴۷	۱۱/۷۲	۲/۵۸۷	۲/۵۳۷	۱۰/۸۲۲	دومین مود خمشی
مود چهارم	۱۲/۵	۱/۸۲۷	۱۲/۶	۲/۵۸۴	۰/۸۰	۱۰/۸۸۱	دومین مود پیچشی



شکل (۱۰) اشکال مودی عرشه حاصل از انجام آزمایش بر روی پل جدید



شکل (۱۱) اشکال مودی حاصل از تحلیل مدل اجزای محدود پل جدید

#### ۴-۳- همبستگی نتایج آزمایش و مدل اجزای محدود

مطابق با رابطه (۱) برای بررسی دقت مدل اجزای محدود در باز تولید نتایج آزمایش و در واقع برای بررسی میزان همبستگی شکل‌های مودی حاصل از آزمایش و نتایج مدل اجزای محدود، از معیار شناخته‌شده اطمینان مودی<sup>۱</sup> (MAC) استفاده شد [۱۰]:

$$MAC(i, j) = \frac{|\{\varphi\}_{Ei}^T \{\varphi\}_{Fj}|^2}{|\{\varphi\}_{Ei}^T \{\varphi\}_{Ei} \times |\{\varphi\}_{Fj}^T \{\varphi\}_{Fj}|} \quad (1)$$

نتایج عددی حاصل از انجام این آزمایش‌ها روی عرشه پل جدید در دو زمان خشک‌سالی و پرآبی رودخانه، به روش تجزیه در حوزه فرکانس و مقادیر میرایی متناظر هر مود به روش تجزیه در حوزه فرکانس بهبودیافته در جدول (۲) ارائه شده است. شکل (۱۰) نیز اشکال مودی حاصل از آزمایش را نشان می‌دهد. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار "SAP2000"، مدل اجزای محدود این پل بر اساس نقشه‌های طراحی تهیه شد. شکل (۱۱) اشکال مودی و جدول (۲) نتایج حاصل از این مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

1- Modal Assurance Criterion (MAC)

یکدیگر همبستگی دارند. در واقع این تشابه دینامیکی بیانگر آن است که هر دهانه از پل قدیمی به لحاظ هندسه اجراشده، مقاومت مصالح به کار رفته و شرایط مرزی، بسیار مشابه با دهانه دیگر است. همچنین نتایج جدول (۱) نشان از انطباق بسیار خوب مقادیر فرکانس‌های طبیعی حاصل از آزمایش و مدل اجزای محدود این پل دارد، در این خصوص بیشینه اختلاف میان نتایج آزمایش و مدل اجزای محدود آن کمتر از ۸ درصد است. از طرفی مطابق با نتایج جدول (۳)، اشکال مودی حاصل از مدل اجزای محدود پل قدیمی بیش از ۹۶ درصد منطبق بر نتایج آزمایش آن است. در واقع این موضوع در کنار تشابه دینامیکی بسیار نزدیک مشخصات دینامیکی دهانه‌های اول و دوم این پل، بیانگر تطابق مناسب شرایط اجرا با نقشه‌های طراحی است. پس در مجموع می‌توان گفت علی‌رغم گذشت بیش از یک دهه از عمر سرویس‌دهی این سازه، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مقادیر سختی هر دهانه رخ نداده است.

مقایسه نتایج جدول (۲) که مربوط به نتایج آزمایش و مدل تحلیلی پل جدید است نشان می‌دهد، مقادیر فرکانسی مدل اجزای محدود این پل که برگرفته از نقشه‌های طراحی آن است، به خصوص در مودهای اولیه با نتایج حاصل از انجام آزمون‌های مودال تجربی متشابه است. به گونه‌ای که اختلاف میان نتایج آزمایش و مدل اجزای محدود در سه مود اول این پل بین ۳ تا ۷ درصد و در خصوص مود چهارم ۱۳ درصد است. نتایج جدول (۳) برای پل جدید نشان می‌دهد تطابق مناسبی میان شکل‌های مودی حاصل از آزمایش و مدل تحلیلی اجزای محدود این پل برقرار است، به گونه‌ای که کمینه این انطباق بیش از ۹۳ درصد است. در واقع تطابق مشخصات فرکانسی نتایج آزمایش و مدل اجزای محدود پل جدید در کنار مقادیر اطمینان مودی به

در این رابطه  $\{\Phi\}_{Ei}$  بردار  $i$ ام شکل مودی حاصل از آزمایش و  $\{\Phi\}_{Ej}$  بردار  $j$ ام شکل مودی حاصل از مدل اجزای محدود است. اندیس  $E$  به آزمایش و اندیس  $F$  به مدل اجزای محدود اشاره دارد. جدول (۳) مقادیر عددی معیار اطمینان مودی برای پل قدیمی و جدید را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است پل قدیمی دارای دو دهانه جدا از یکدیگر است و به این منظور در جدول (۳) میزان همبستگی اشکال مودی حاصل از آزمایش آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول (۳) مقادیر شاخص اطمینان مودی (MAC) برای پل‌های قدیمی و جدید

تجرب ی پل قدیم	مقایسه نتایج آزمایش دهانه اول و دهانه دوم	۰/۹۸ = مود اول خمشی ۰/۹۹ = مود اول پیچشی
	مقایسه نتایج آزمایش دهانه اول و مدل اجزای محدود	۰/۹۸ = مود اول خمشی ۰/۹۶ = مود اول پیچشی
	مقایسه نتایج آزمایش دهانه دوم و مدل اجزای محدود	۰/۹۸ = مود اول خمشی ۰/۹۷ = مود اول پیچشی
	مقایسه نتایج آزمایش و مدل اجزای محدود (در زمان خشکی رودخانه)	۰/۹۷ = مود اول خمشی ۰/۹۶ = مود دوم خمشی ۰/۹۳ = مود اول پیچشی ۰/۹۴ = مود دوم پیچشی

## ۵- تحلیل نتایج

نتایج جدول (۱) که مربوط به نتایج آزمایش و مدل تحلیلی پل قدیمی است نشان می‌دهد، مشخصات دینامیکی هر دو دهانه پل قدیمی بسیار شبیه یکدیگر است، به گونه‌ای که بیشینه اختلاف فرکانسی به دست آمده میان آن‌ها ۳/۵۹ درصد است. همچنین، بیشینه میرایی به دست آمده برای هر دهانه از عرشه این پل بیشینه ۵/۶ درصد است. از طرفی نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد، اشکال مودی حاصل از نتایج آزمایش دهانه اول و دهانه دوم بیش از ۹۸ درصد با



دست آمده، بیانگر تطابق مناسب شرایط اجرای این پل با نقشه‌های طراحی است.

مقایسه نتایج جداول (۱) و (۲) و اشکال مودی متناظر پل‌های جدید و قدیم نشان می‌دهد، با آنکه شرایط مرزی تکیه‌گاهی عرشه دو پل متفاوت است اما مودهای هم‌نام پل قدیمی و پل جدید در هر دهانه یکسان است. هرچند مقایسه عددی همبستگی این اشکال مودی به دلیل تفاوت در شرایط تکیه‌گاهی دو پل نمی‌تواند نتایج مناسبی را ارائه نماید اما اختلاف فرکانسی میان آن‌ها در مودهای هم‌نام قابل مقایسه است. به گونه‌ای که، بیشینه اختلاف فرکانسی آزمایش میان پل جدید و قدیمی در مود اول خمشی آن‌ها رخ داده است و این مقدار بیشینه برابر ۲۲/۹۷ درصد است. در خصوص مود اول پیچشی نیز مقدار فرکانس ارتعاشی پل جدید ۱۴/۲۳ درصد از فرکانس ارتعاشی پل قدیمی بیشتر است. باید توجه داشت با وجود صلبیت خمشی بیشتر شاهتیرهای عرشه پل قدیمی و وزن برابر عرشه آن نسبت به پل جدید، مقادیر فرکانس‌های پل جدید بیش از پل قدیمی است و این موضوع با توجه به طول دهانه یکسان دو سازه، بیشتر به دلیل افزایش سختی ناشی از تفاوت در شرایط مرزی دو سازه است و در صورت یکسان بودن ابعاد شاهتیرها و جرم دو عرشه این اختلاف در مقادیر فرکانسی بیشتر خواهد شد. همچنین با مقایسه نتایج جدول (۲) در دو زمان خشکی و پرآبی رودخانه ملاحظه می‌شود، مقادیر فرکانس‌های ارتعاشی در مرحله دوم آزمایش (زمان پرآبی رودخانه) در حدود ۳ درصد نسبت به مرحله اول (زمان خشکی رودخانه) افزایش یافته است. این افزایش در تمام مودها دیده می‌شود و با افزایش در مقادیر میرایی سازه به ویژه در مود اول خمشی (۵۲ درصد) همراه است. بنابراین به نظر می‌رسد آب موجود در اطراف پایه‌های پل به عنوان نوعی میراگر موجب افزایش میرایی و

سختی در سازه شده است.

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، پل جدید دارای سیستم قابی شکل است و انتظار می‌رود در نزدیک پایه و کوله‌ها رفتاری مشابه تکیه‌گاه گیردار داشته باشد، به این منظور مطابق شکل (۵)، در نزدیک محور مرکزی و در دو طرف پایه پل، به فاصله ۸۲ سانتی‌متر (۵ درصد طول دهانه) و ۲/۴۷ متری (۱۵ درصد طول دهانه) از مرکز پایه و در نزدیکی کوله به فاصله ۲/۴۷ متری از ابتدای کوله، شتاب‌سنج قرار داده شد تا در این نقاط رفتار عرشه با دقت بیشتری رصد شود. شکل (۱۰) چگونگی حرکت عرشه در تکیه‌گاه را به خوبی نمایش می‌دهند. همان‌گونه که در این اشکال ملاحظه می‌شود، در فواصل نزدیک به پایه رفتاری شبیه حالت نظری یک اتصال گیردار یا صلب کامل به وجود آمده است. به گونه‌ای که برای پایه میانی، حالت مورد انتظار در تئوری در خصوص مود اول و دوم پیچشی و همچنین مود دوم خمشی مشهود است. در تمامی مودها برای این تکیه‌گاه، میزان گیرداری تا محل قرارگیری شتاب‌سنج شماره ۵ و ۶ یعنی ۸۲ سانتی‌متری از مرکز تکیه‌گاه زیاد و به تدریج کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که از فاصله ۲/۴۷ متری مرکز پایه میانی به بعد شیب منحنی تغییر شکل عرشه، مشابه حرکات یک-دوم میانی هر دهانه می‌شود. در خصوص کوله‌ها نیز شکل جابه‌جایی عرشه در نزدیکی تکیه‌گاه به خصوص در مودهای اول و دوم خمشی مشابه حرکت یک اتصال گیردار است در این مودها شیب منحنی تغییر شکل عرشه با شیب خط دو-سوم میانی هر دهانه متفاوت است. اما در خصوص مودهای پیچشی، حرکات ثبت‌شده در کوله‌ها شباهت کمتری نسبت به حرکت اتصال گیردار در حالت نظری دارد. به طور کلی مقادیر معیار اطمینان مودی برای پل جدید (جدول ۳) نشان می‌دهد، حرکات واقعی عرشه این پل که به وسیله‌ی آزمایش رصد

همراه است که در خصوص این مطالعه ۵۲ درصد گزارش شده است. بنابراین این نظریه قوت می‌یابد که وجود آب در اطراف پایه‌ها می‌تواند به عنوان نوعی میراگر موجب افزایش میرایی و سختی در سازه شود.

## ۶- مراجع

- [1] Mertlich, T.; Halling, M.; and Barr, P.; "Dynamic and static behavior of a curved-girder bridge with varying boundary conditions"; *Performance Constructed Facilities*; 21(3), 2007, 185-192.
- [2] Fayyadh, M. M.; Abdul Razak, H.; and Khaleel, O. R.; "Differential effects of support conditions on dynamic parameters"; *The Proceedings of the Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia Engineering*; 14, 2011, 177-184.
- [3] Maalek, Sh.; 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*; 6(6), 2010, 753-765.
- [4] Carvajal, J. C.; Ventura, C. E.; and Huffman, S.; "Ambient vibration testing of multi-span bridges with integral deck-abutments"; *Proceedings of the IMAC-XXVII. February 9-12, 2009, Orlando, Florida USA*.
- [5] Magalhães, F.; Cunha, A.; and Caetano, E.; "Online automatic identification of the modal parameters of a long span arch bridge"; *Mechanical Systems and Signal Processing*; 23(2), 2009, 316-329.
- [6] Wenzel, H.; "Health monitoring of bridges"; John Wiley & Sons, Ltd. 2009.
- [7] Ceravolo, R.; and Abbiati, G.; "Time domain identification of structures: Comparative analysis of output-only methods" *Engineering Mechanics*; 139(4), 2013, 537-544.
- [8] Le, T.P.; and Paultre, P.; "Modal identification based on the time-frequency domain decomposition of unknown-input dynamic tests"; *Mechanical Sciences*; 71, 2013, 41-50.
- [9] *Structural Vibrations Solutions*; "ARTEMIS Extractor Pro 3.43"; Denmark, 1999-2004.
- [10] Ewins D. J.; "Modal Testing: Theory, Practice and Application"; England Research Studies Press LTD, 2000.

شده است تطابق زیادی با حرکات عرشه در مدل اجزای محدود دارد، به‌گونه‌ای که در مورد مودهای پیچشی این معیار بیش از ۹۳ درصد و در مورد مودهای خمشی این معیار بیش از ۹۶ درصد است. بنابراین با توجه به مقایسه‌های انجام شده می‌توان بیان نمود که شرایط حالت گیرداری در تکیه‌گاه‌های پل وجود دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج مشخصات دینامیکی حاصل از انجام آزمایش مودال و مدل‌سازی اجزای محدود بر روی دو پل بتنی متشابه با عرشه تیر و دال بتنی که دارای طول دهانه یکسان و شرایط مرزی و تکیه‌گاهی متفاوت است نشان داد، هر دو پل از شرایط اجرایی مناسبی برخوردارند و تطابق مناسبی نیز میان هندسه اجراشده و نقشه‌های طراحی آن‌ها وجود دارد. مقادیر معیار اطمینان مودی نیز نشان می‌دهد در تمام مودها، همبستگی مناسبی میان مدل اجزای محدود و نتایج آزمایش وجود دارد. بررسی تغییر شکل عرشه در نزدیک محل اتصال به پایه و کوله نشان از انطباق مناسب فرض مورد انتظار گیرداری در حالت تحلیلی است و این شرایط گیرداری در پل جدید نسبت به پل قدیمی که دارای تکیه‌گاه ساده است موجب افزایش ۲۰ تا ۲۵ درصدی مقادیر فرکانس‌های طبیعی مودهای خمشی و افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی فرکانس‌های طبیعی مودهای پیچشی شده است. همچنین نتایج حاصل از آزمایش مودال در دو فصل خشکی و پرآبی رودخانه بر روی پل جدید که اتصالات عرشه به پایه و کوله در آن پیوسته بود نشان داد، غرق شدن پایه‌ها در آب می‌تواند بیش از ۳ درصد مقادیر فرکانس‌های طبیعی مودهای نخست سازه را افزایش دهد که این مقدار با افزایش قابل توجهی در مقادیر میرایی مودهای نخست

«Research Note»

## Comparison of the Vibrational Frequencies of RC Slab-on-Girder Bridge via Theoretical and Experimental Methods

S. Maadani<sup>1\*</sup>, R. Akbari<sup>1</sup>, Sh. Maalek<sup>2</sup>

1- Department of Civil Eng., Isfahan Science and Research Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2- School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

S\_maadani@yahoo.com

### Abstract:

In this paper, the dynamic characteristics of two highway bridges have been extracted via performing several operational modal tests. The tests have been performed during the normal traffic passage and ambient condition. The first bridge studied here, the "Ziar#1" Bridge built in 2003s in the road between the cities of Isfahan and Ziar, is a two span reinforced concrete with cast in place slab-on-rectangular girder superstructure system with the total length of 33 m. The deck is simply supported over a wall type middle pier and two side abutments with closed type. The superstructure is supported by the piers and abutments through elastomeric bearings. The second bridge, the "Ziar#2" Bridge built in 2012s as the new line of that road, is a two span reinforced concrete with in-site slab-on-precast girder superstructure system with similar length of the first bridge. The deck of this bridge is continuous without middle or side expansion joints and is supported over a pier bent consisting of a bent cap and three circular columns. The bridges, which pass over the "Zayandeh-Rood" river, are structurally separate and a 50cm distance has been provided between them. Both the bridges have similar geometry but different boundary conditions. The results of the modal tests have been also compared with the results of supporting finite element models of the bridges and the effects of boundary conditions on the dynamic characteristics of the bridges have been investigated.

At the time of the first phase experiments, the river was dry due to drought in recent years and the level of underground water was sufficiently deep. It is predicted that presence of water current around bridge piers, in which the superstructure have monolithic connection with piers and side abutments, may change the dynamic properties of superstructure. In order to investigate to what extent the presence of water current in the river may affect the dynamic characteristics of the bridges; additional modal test has been performed on the second bridge, in which its deck is continuously connected to the supporting elements. On the other hand, the seasonal effects of the water current in the river on the dynamic characteristics of one of the bridges, as representative of reinforced concrete slab-on-girder integral bridges, have been also studied. In order to realize to what extent the pier-superstructure connection in this bridge is monolithic, the actual displacement pattern of the measurement points on the superstructure at the pier location has been closely measured and compared with corresponding results of the finite element model of the bridge. The results show that, as far as the boundary conditions of the deck is concerned, it has significant effect on the dynamic behavior and corresponding natural frequencies of the superstructure, especially in the first bending and the first torsional modes. Also, it was found that the presence of water current around the piers of the bridge leads to slightly increase in the natural frequency and the associated damping values of the bridge.

**Keywords:** Dynamic Characteristics, Ambient Vibration Test, Boundary Conditions, Concrete Bridges.