

علمی- تخصصی

پایش سلامت پل سگمنتال تقاطع امام خمینی (ره) کرمانشاه با استفاده از روش ماتریس نرمی بر

پایه فرکانس‌های طبیعی

مهدی پرویزی^{۱*}، صفدر کهریزی^۲

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹)

چکیده

در سال‌های اخیر شناسایی آسیب بر پایه ارتعاش برای ارزیابی خسارت در سازه به کار گرفته شده است. در این حالت تشخیص آسیب بر مبنای تغییر پاسخ دینامیکی قبل و بعد از خرابی است. در این پژوهش از روش ماتریس نرمی برای شناسایی آسیب در پل‌های سگمنتال (پل تقاطع امام خمینی (ره) استفاده شده است. مزیت این روش، دقت و حساسیت آن به تعداد موده‌های اندک برای سازه‌های بزرگ است. این پل در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و پس از اعمال وزن و نیروی پیش‌تنیدگی در کابل‌ها، فرکانس و اشکال مودی برای شرایط سالم و آسیب‌دیده استخراج شد. شرایط آسیب‌دیده شامل سه سناریو به صورت تکی (در یک مکان) و چندگانه (در چند مکان و به صورت هم‌زمان) در عرشه پل و همچنین اعمال آسیب در ستون بود. هرکدام از آسیب‌های فوق شامل کاهش سختی معادل به اندازه ۳۰ درصد بود. نتایج نشان داد که این روش قادر به تشخیص آسیب‌ها در عرشه بود. اما برای پایش سلامت ستون، به بررسی بیشتری نیاز داشت. همچنین دقت پایش سلامت با استفاده از دو مود نیز بررسی شد که از دقت قابل‌قبولی نسبت به استفاده از ۶ مود برخوردار بود.

کلیدواژه‌ها: پایش سلامت، ماتریس نرمی، پل سگمنتال، تحلیل مودال، تحلیل اجزا محدود.

۱. مقدمه

پل‌ها سازه‌های عظیمی هستند که برای احداث آن‌ها به حجم زیادی از مصالح، نیروی کار ماهر و ماشین‌آلات سنگین نیاز است و جز پروژه‌های با هزینه بالا به شمار می‌آیند [۱]. پل‌ها جز زیرساخت‌های مهم و برطرف‌کننده نیازهای روزمره جوامع امروزی هستند و فعالیت جوامع امروزی در گرو کارایی مؤثر آن‌هاست. بنابراین هرگونه خلل در کارایی پل‌ها می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری را به شاکله اجتماعی وارد کند.

سازمان حمل‌ونقل آمریکا، سالانه گزارشی در مورد پل‌های کشور آمریکا منتشر می‌کند. بر اساس گزارش ارائه‌شده این سازمان در سال ۲۰۱۳، بیشتر از ۶۶۴۰۵ پل، از نظر ساختاری دچار نقص شده‌اند. به عبارتی دیگر یک پل از هر نه پل (۱۱ درصد) دارای نقص در اعضای سازه‌ای می‌باشند [۲]. بنابراین وقوع خرابی در طول عمر پل‌ها اجتناب‌ناپذیر است. بیشتر چنین خرابی‌ها را می-

توان با بررسی‌های اولیه از وضعیت موجود سازه‌ها اصلاح و ترمیم نمود و از گسترش خرابی در سازه و فرو ریختن آن جلوگیری کرد. معمولاً شرایط یک پل در بازرسی‌های چشمی دوره‌ای ارزیابی می‌شود. باوجوداینکه از این بازرسی‌ها اطلاعات مهمی به دست می‌آید اما بازرسی کل سازه پل به دلیل مقاطع دور از دسترس آن میسر نیست و خرابی در این محل‌ها قابل تشخیص نیست. بنابراین پایش سلامت پل و گزارش زمان و موقعیتی که به عملیات تعمیر و نگهداری مورد نیاز است، ضروری هست [۳، ۴]. هدف از روش‌های پایش سلامت سازه استفاده آن‌ها در کنار بازدید و بازرسی چشمی پل است. برای این منظور از روش‌های شناخته‌شده پایش سلامت بر پایه ارتعاش استفاده می‌شود [۵]. بسیاری از روش‌های مورد استفاده مبتنی بر ارتعاش، برای تشخیص آسیب اولیه، از شناسایی سیستم مودال و مقایسه پارامترهای مودال سازه معیوب با سازه سالم استفاده می‌کنند [۶]. روش شناسایی آسیب بر پایه ارتعاش از جمله روش‌هایی

است که برای ارزیابی خرابی در سطح کل سازه به کار می‌رود. مبانی تئوری آنالیز مودال در عیب‌یابی و شناخت نقصان از طریق ردگیری تغییرات در خصوصیات دینامیکی یا پاسخ سازه‌ای در اثر ایجاد عیوب، راه‌حلی است که در تکمیل بازرسی‌های چشمی امکان پایش سلامت سازه‌ای پل‌ها را به‌صورت دقیق فراهم می‌آورد.

در دهه‌های اخیر رشد فعالیت‌های تحقیقاتی در زمینه پایش سلامت سازه و کاربرد آن در مهندسی عمران، موجب ابداع تکنیک‌ها و روش‌های مختلفی در ارزیابی دائم و متناوب سازه‌ها گردیده است. [۷] در یک مطالعه به بررسی تغییر خواص دینامیکی در قسمتی از یک پل بزرگراهی سه دهانه، به‌عنوان یک روش برای تشخیص ترک ناشی از خستگی در تیرهای پل پرداختند. تحریک توسط یک محرک الکتروهیدرولیک اعمال شد و ضرایب سختی از تعیین شکل مودی تجربی محاسبه شد. نتایج نشان داد که تغییرات در سختی پل در اثر ارتعاش می‌تواند به‌عنوان شاخص آسیب ناشی از خستگی استفاده شود. در یک تحقیق [۸] آزمایش مودال را در دو دهانه پل کامپوزیتی در دو شرایط سالم و آسیب‌دیده انجام دادند. آسیب شامل یک ترک خستگی بزرگ شبیه‌سازی شده با رها کردن مجموعه‌ای از پیچ و مهره در یک اتصال فولادی بود. نتایج، افت اندک فرکانس متناظر با ترک را نشان داد. محققان [۹] به بررسی گروهی از تیرها پرداختند. این تیرها به‌گونه‌ای طراحی شدند که پاسخ دینامیکی آن‌ها مشابه پل باشد. از نظر آن‌ها تغییر فرکانس پارامتر مناسبی جهت سنجش سلامت پل نبود، زیرا در حالت آسیب بحرانی حداکثر تغییر در فرکانس برابر پنج درصد بود. در یک آزمایش دیگر [۱۰] آزمون ضربه را در پل سه دهانه را باهدف تشخیص آسیب‌های محلی انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که اگر پارامترهای مودال برای چند مود اول باشد ممکن است به‌عنوان شاخص آسیب قابل اعتماد نباشد و اطلاعات مودهای بالاتر نیز لازم است. پژوهشگران [۱۱] در تشخیص آسیب از فرکانس‌های طبیعی پل به جای اشکال مودی استفاده کردند. این تحقیقات بر این اساس بود که فرکانس‌های طبیعی مانند اشکال مودی به محل و مقدار آسیب، حساسیت دارند. در یک مقاله [۱۲]، تلاش کردند که این روش شناسایی آسیب را در یک پل کامپوزیت تخریب‌شده با عمر بالا به کار ببرند. قطع حدود نصف مقطع عرضی شاه‌تیر پل تنها باعث تغییر هشت‌درصدی در اولین فرکانس طبیعی پل شد. همچنین محققان دیگر [۱۳] مروری بر روش‌های نظارت بر پایه ارتعاش ۱۳ سازه (بیشتر پل) انجام دادند و نتیجه گرفتند که در صورت مهم بودن عیب‌یابی، روش‌های مبتنی بر ارتعاش مناسب نیست.

باوجود دشواری استفاده از فرکانس طبیعی در شناسایی آسیب، مطالعات فراوانی در این زمینه صورت گرفته است. امروزه برای

شناسایی آسیب، فرکانس‌های طبیعی در ترکیب با سایر پارامترهای مودال به کار می‌روند. گروه دیگری از روش‌های شناسایی آسیب با استفاده از ماتریس نرمی، به بررسی رفتار استاتیکی می‌پردازند. به دلیل رابطه‌ی معکوس ماتریس نرمی با فرکانس‌های طبیعی، این ماتریس با افزایش تعداد مودها به‌سرعت همگرا می‌شود. بنابراین تنها با استفاده از فرکانس‌های پایین می‌توان به‌تقریب مناسبی از ماتریس نرمی دست‌یافت. در ادامه به چند مورد از کارهای انجام‌شده با روش ماتریس نرمی اشاره می‌شود.

کارشناسان [۱۴] از تغییر در ماتریس نرمی، برای پایش سلامت چند مدل عددی و یک مدل آزمایشگاهی استفاده کردند. نتایج قابل قبول آن‌ها بر روی مدل‌های عددی و آزمایشگاهی، بیان‌گر قابل اعتماد بودن این روش در پایش سلامت سازه‌های بزرگ مقیاس بود. نتایج مدل‌های عددی نشان داد هنگامی که خرابی در موقعیت متناظر با لنگر خمشی بیشینه باشد، این روش بهترین نتیجه را ارائه می‌دهد. همچنین آن‌ها بیان کردند که ماتریس نرمی به میزان بسیار کمی تحت تأثیر مدهای بالاتر است.

در مطالعه‌ای دیگر [۱۵] از نرمی مودال به‌عنوان شاخص ارزیابی سازه استفاده کردند. شاخص نرمی با استفاده از نتایج آزمون مودال محاسبه شد. آن‌ها این تکنیک را برای هفت پل بزرگراهی به کار بردند. قابلیت اطمینان نرمی مودال با مقایسه تغییر شکل‌های به‌دست‌آمده از نرمی مودال و تغییر شکل استاتیکی پل تحت مجموعه آزمایشی بار کامیون، اعتبارسنجی شد. [۱۶] شرایط سازه‌ای یک پل بتنی ۳ دهانه را با استفاده از نرمی مودال بررسی کردند. در این آزمایش که بر روی یک پل واقعی انجام شد، آزمایش‌های مودال قبل از آسیب و همچنین در مراحل مختلف آسیب انجام شد و فرکانس و میرایی مدهای مختلف در هر مرحله برداشت شدند. در هر مرحله ماتریس نرمی از مدهای سازه استخراج شد و پس‌از آن پروفیل تغییر شکل پل تحت الگوهای مختلف بارگذاری، محاسبه و میزان و محدوده خسارت با مقایسه پروفیل‌های تغییر شکل مشخص شد. در ادامه یک مدل اجزا محدود بسط داده شد که با نتایج آزمایش مودال قبل از خسارت اعتبارسنجی شد و به پایش سلامت پل، تحت بارگذاری‌های مختلف پرداختند. [۱۷] جهت پایش سلامت پل‌های بزرگ‌راهی، روشی بر مبنای نرمی مودال ارائه کردند. آن‌ها این روش را بر روی یک تیر فولادی، یک تیر بتنی و یک پل به کار بردند. نتایج نشان داد که شاخص نرمی به میزان قابل توجهی به خرابی حساس است. در مطالعه دیگر [۱۸] ماتریس‌های نرمی بر پایه پارامترهای مودال به‌دست‌آمده با تکنیک زیر فضایی، محاسبه شدند. محل خسارت با مقایسه ماتریس‌های نرمی بین حالت‌های اولیه و خسارت‌دیده، شناسایی شد. محدودیت‌های این تکنیک با

[۲۴] مقاومت سازه‌های فولادی را در برابر آتش‌سوزی به‌صورت عددی بررسی کردند. این ارزیابی بر روی سازه ساختمان توقفگاه خط ۲ قطار شهری مشهد انجام شده است. نتایج تحلیل نشان داد که سازه سوله توقفگاه تحت بحرانی‌ترین سناریو آتش، حداقل ۱۰ دقیقه می‌تواند در برابر فروپاشی ناشی از آتش مقاومت کند. همچنین با بررسی دو سناریو آتش‌سوزی مشخص شد که سناریو آتش‌سوزی متقارن در سرتاسر دهانه از سناریو آتش‌سوزی نامتقارن در قسمتی از دهانه، بحرانی‌تری است.

این مقاله به شناسایی آسیب در سیستم سازه‌ای پل سگمنتال تقاطع امام خمینی (ره) می‌پردازد و مسئله عیب‌یابی بر اساس تعریف ماتریس نرمی مبتنی بر پارامترهای مودال مطرح می‌شود. و کارایی این روش در مکان‌یابی خرابی این پل‌ها ارزیابی می‌شود. درواقع روش شناسایی آسیب مبتنی بر نرمی بر این واقعیت است که یک نمایش منطقی دقیق از ماتریس نرمی را می‌توان با اندازه‌گیری چند مود اساسی به دست آورد و درنهایت با مقایسه ماتریس نرمی سازه در دو حالت سالم و آسیب‌دیده به بررسی سلامت سازه پرداخت. در ادامه به معرفی هندسه و خصوصیات سازه‌ای این پل و مدل‌سازی آن پرداخته می‌شود.

۲. روش تحقیق

روش شناسایی آسیب با استفاده از ماتریس نرمی دینامیکی مودال، برآورد تغییرات در رفتار استاتیکی سازه می‌باشد. ماتریس نرمی یک سازه برابر با معکوس ماتریس سختی آن است و از این رو بیان‌گر رابطه بین نیرو و تغییر مکان سازه هست. ماتریس نرمی اندازه‌گیری شده به کمک اشکال مودی نرمال شده بر مبنای جرم، شکل مودی و فرکانس‌های طبیعی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$[F] = \left(\sum_{i=1}^N \frac{\phi_i \phi_i^T}{\omega_i^2} \right) \quad (1)$$

تعیین دقیق ماتریس نرمی نیازمند اندازه‌گیری تمامی مودها و فرکانس‌ها است. به دلیل رابطه‌ی معکوس ماتریس نرمی با فرکانس‌های طبیعی، این ماتریس با افزایش تعداد مودها به‌سرعت همگرا می‌شود. بنابراین تنها با استفاده از فرکانس‌های پایین می‌توان به‌تقریب مناسبی از ماتریس نرمی دست‌یافت. از این رو ماتریس نرمی به تغییر در مودهای پایین حساس‌تر است. برای یک سیستم با n درجه آزادی، n مود مستقل وجود دارد. از آنجاکه ماتریس نرمی به مودهای بالا حساس نیست یک نمایش منطقی از ماتریس انعطاف‌پذیری را می‌توان با استفاده از تعداد کمی از مودها، از طریق رابطه ۲ به دست آورد.

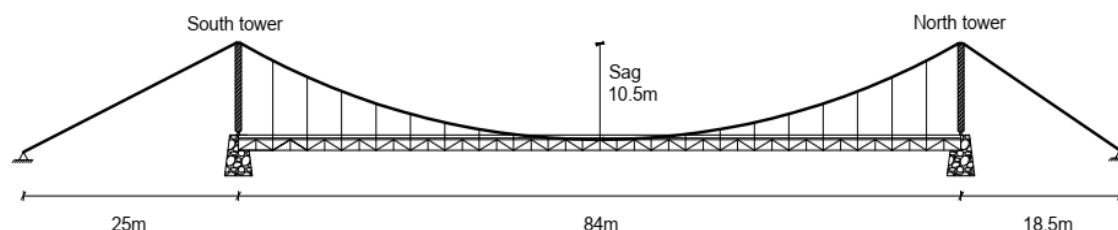
$$[F]_{n \times n} \approx [\Phi]_{n \times k} [\Lambda]_{k \times k}^{-1} [\Phi]^T_{k \times n} \quad (2)$$

مدل‌های عددی تیر طره‌ای و پل سه دهانه بتنی، نشان داده شد. محققان [۱۹] روش به‌اصطلاح نرمی محلی را پیشنهاد دادند که تغییرات سختی محلی را بر پایه پارامترهای مودال تعیین شده، شناسایی می‌کند. این روش با ارزیابی خسارت در تیرهای ۶ متری شبیه‌سازی شده و انجام آزمایش بر روی پل Z-24 سویس، اعتبارسنجی شد. نتایج یک تحقیق نشان داد [۲۰] پایش سلامت پل‌های با دهانه بزرگ را با یک روش چند-متریک^۱ برای بهبود تشخیص آسیب قابل اجرا است. این روش بر پایه ادغام داده‌های سطح استخراج ویژگی، برای افزایش محتوای اطلاعات سنسورهای شتاب و کرنش بود. پس از اعمال معیار نرمی، ماتریس‌های نرمی بر پایه اطلاعات کرنش و جابجایی، پس از تبدیل مختصات، ترکیب شدند. در ادامه یک مطالعه روی مدل اجزا محدود پل Belt east انجام شد. سناریوهای مختلف خرابی شامل خسارت تیرورق، شکستگی نگهدارنده کابل‌ها، نشست اسکله و کاهش نیروی پیش‌تنیدگی کابل‌ها بودند. این مطالعه نشان داد که استفاده از روش اندازه‌گیری چند-متریک امکان اشتباه را کاهش داده و حساسیت و قدرتمندی تشخیص آسیب را افزایش می‌دهد. یکی از پژوهشگران [۲۱] روش مودال را برای شناسایی آسیب و محل آن در پل معلق به کار بردند. آن‌ها از شاخص‌های قائم و افقی آسیب برای شناسایی آسیب و محل آن در کابل‌ها و آویزهای آن‌ها استفاده کردند. سناریوهای آسیب تکی، چندگانه و گروهی برای شبیه‌سازی آسیب به کار گرفته و توانمندی این روش نشان داده شد. نتایج نشان داد که تعیین شاخص آسیب قائم با استفاده از چند مود اندک، به‌خوبی آسیب را در پل معلق واقعی شناسایی می‌کند. اسکومر و همکاران [۲۲] بر پایه روش ماتریس نرمی به ارزیابی خسارت مدل‌های تئوری و دو پل واقعی پرداختند. در ابتدا سه مدل تئوری شامل تیرهای با شرایط مرزی مختلف تحت سناریوهای مختلف خرابی، تحلیل شدند و قابلیت روش ماتریس نرمی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در مدل‌های واقعی، بر پایه جرم‌های مودی، اشکال مودی و فرکانس‌های متناظر با آن‌ها، ماتریس نرمی محاسبه و تشخیص آسیب بر پایه این روش انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از روش ماتریس نرمی در تشخیص آسیب سازه‌ها، امکان‌پذیر و مؤثر است. لیو و لی [۲۳] روش ماتریس نرمی تعمیم‌یافته را بهبود بخشیدند. روش تعمیم‌یافته نسبت به روش سنتی به تعداد مودهای کمتری برای استخراج ماتریس نرمی نیاز داشت. در این پژوهش با در نظر گرفتن نامنفی حد خسارت، روش ماتریس نرمی بهبود پیدا کرد. حل مثال‌های عددی با سناریوهای مختلف خرابی، نشان داد که روش پیشنهادی، بهتر از روش ماتریس نرمی تعمیم‌یافته عمل می‌کند. کفاش و همکاران

¹ Multi-metric method

سازی پل، استخراج فرکانس‌های پل در بدو بهره‌برداری است. اما این کار دارای محدودیت‌های زیادی است. یکی از روش‌های جایگزین، استفاده از نتایج موجود در مراجع علمی معتبر و مشابه با پژوهش موردنظر است. برای پژوهش حاضر از نتایج استخراج میدانی فرکانس‌های پل کابلی آلفوسا [۲۵] استفاده شده است. از دلایل اصلی این انتخاب، وجود کابل‌های پیش‌تنیدگی و عرشه بتنی در این پل بود. البته وجود فرکانس‌های استخراج بر مبنای نتایج میدانی نیز معیار مهمی بود. اعتبار سنجی روش شبیه‌سازی با نتایج پل آلفوسا می‌تواند مدل‌سازی رفتاری کابل و بتن را صحت‌گذاری کند. زیرا این دو قسمت از اجزای مهم پل‌های سگمنتال هستند.

پل اولیه آلفوسا در سال ۱۹۸۱ به‌صورت پل معلق تک خطه، بر روی رودخانه زده شد. در سال ۱۹۴۴ این پل به طرز قابل‌توجهی خسارت دید. در سال بعد و در همان محل، یک پل معلق کابلی تقویت‌شده با خرپای فلزی، و با عرشه بتنی افتتاح شد. طول کلی پل ۱۳۲ متر و طول دهانه اصلی پل که با کابل نگه‌داشته شده، ۸۴ متر است. شکل (۱) شکل این پل را نشان می‌دهد.



شکل (۱). شماتیک پل آلفوسا

فواصل ۴ متر تشکیل شده است. دو خرپای اصلی طولی به‌صورت عمودی و دارای ارتفاع ۱/۶۸۷ متر هستند. خرپای طولی دیگر، خرپای مقاوم در برابر باد است که این دو خرپا را در حالت افقی به یکدیگر متصل می‌کند. ارتفاع خرپاهای عرضی میانی ۱/۱۷۶ و دو خرپای انتهایی ۱/۴۹۶ متر است. دو تیر I- شکل با چرخش ۹۰ درجه، یال‌های پایینی خرپای طولی را شکل می‌دهد. دکل‌های پل از دو مقطع I- شکل و تقویت‌شده با صفحه فولادی، و پر شده با بتن، تشکیل شده است. ارتفاع آن ۱۰/۲ متر از روی عرشه و انت‌های آن به‌صورت مفصلی ساخته شده است که در جهت عرضی پل می‌تواند دوران کند. مشخصات هندسی مقاطع به‌طور مفصل در مرجع [۲۵] آمده است.

که در آن $[\phi]$ ماتریس شکل مودی، $[\Lambda]$ ماتریس قطری مقادیر ویژه و k تعداد مودهای اندازه‌گیری شده است و کمتر از تعداد مودهای تحلیلی است. به‌طور معمول شناسایی آسیب با مقایسه ماتریس‌های نرمی حالت آسیب‌دیده و سالم انجام می‌شود. بنابراین شاخص آسیب را می‌توان از رابطه ۳ محاسبه کرد.

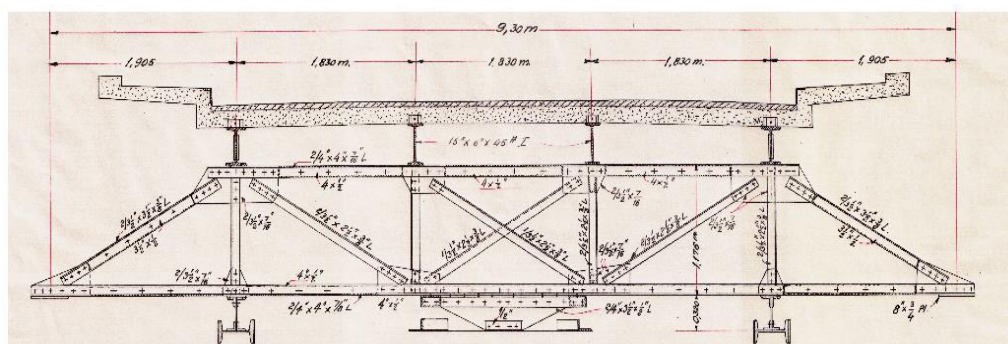
$$MFI(j) = F_{\text{damaged}}(j, j) - F_{\text{healthy}}(j, j) \quad (3)$$

از آنجاکه در اثر آسیب نرم سازه در محل آسیب بیشتر می‌شود، می‌توان گفت که محل بیشترین درایه (بیشترین اختلاف دو ماتریس) در ماتریس شاخص آسیب، می‌تواند محل آسیب باشد. در ادامه به مدل‌سازی اجزا محدود پل سگمنتال و اعتبارسنجی آن پرداخته می‌شود.

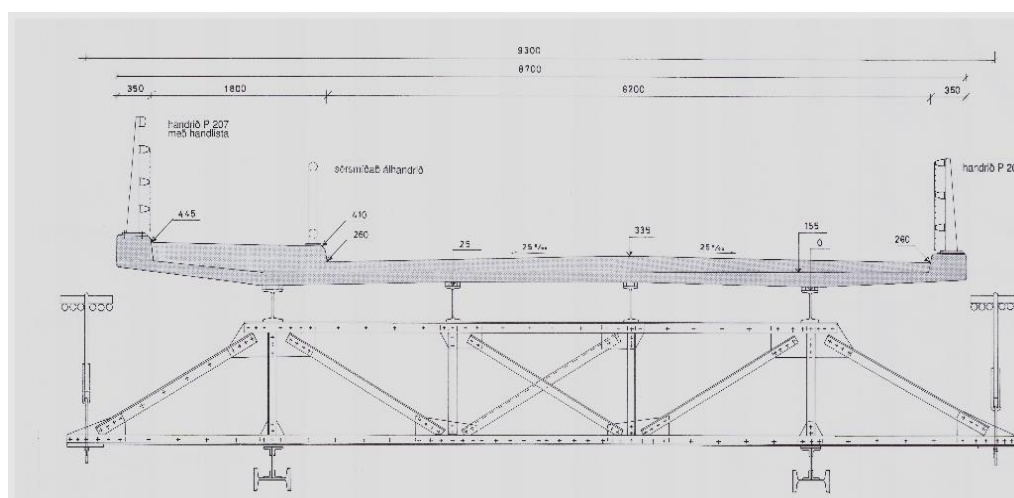
۲-۱. اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی

مبنای استفاده از نتایج حاصل از هر شبیه‌سازی اعتبار سنجی آن است. دقیق‌ترین نتایج مبنای اعتبار سنجی شبیه‌

پل آلفوسا مجموعاً دارای ۱۲ کابل (۶ عدد در هر سمت) است. قطر هر کابل ۶۰/۱ میلی‌متر، سطح مقطع فعال آن ۲۱۷۴ میلی‌مترمربع و مقاومت آن ۲۷۰ تن است. عرشه پل از طریق میله‌هایی به قطر ۵۰/۸ میلی‌متر و در فواصل ۴ متری به کابل‌ها متصل شده است. عرشه پل در ابتدا دارای ۶ متر عرض ماشین‌رو و یک متر پیاده‌رو در هر طرف بود. در سال ۱۹۹۲ عرشه پل کاملاً بازسازی شد و در حال حاضر عرض آن ۸/۷ متر است. وزن عرشه پل در جریان بازسازی ۳۹/۵ به ۵۷/۲ کیلو نیوتن در هر مترمربع افزایش یافت. تصاویر قدیمی و بازسازی‌شده عرشه بتنی در شکل (۲) نشان داده شده است. عرشه با استفاده از ۴ تیر I- شکل به شاه‌تیر اتصال دارد که از طریق آویزه‌ها به کابل‌ها متصل است. این شاه‌تیر از سه خرپای طولی و خرپاهای عرضی به



الف



ب

شکل (۲). عرشه پل آلفوسا. الف (عرشه قدیمی. ب) عرشه بازسازی شده

۰/۳	۲۱۰	۸۰۰۰	دکل فولادی
۰/۲	۳۲	۲۵۰۰	بتن پرکننده داخل دکل
۰/۲	۳۲	۲۵۰۰	عرشه بتنی
۰/۳	۲۱۰	۹۰۰۰	خرپای فلزی

در شکل (۳) هندسه مدل، و در جدول (۲) مشخصات و اندازه المان‌ها به صورت کلی نشان داده شده است.

جدول (۲). نوع و اندازه تقریبی المان‌های استفاده شده

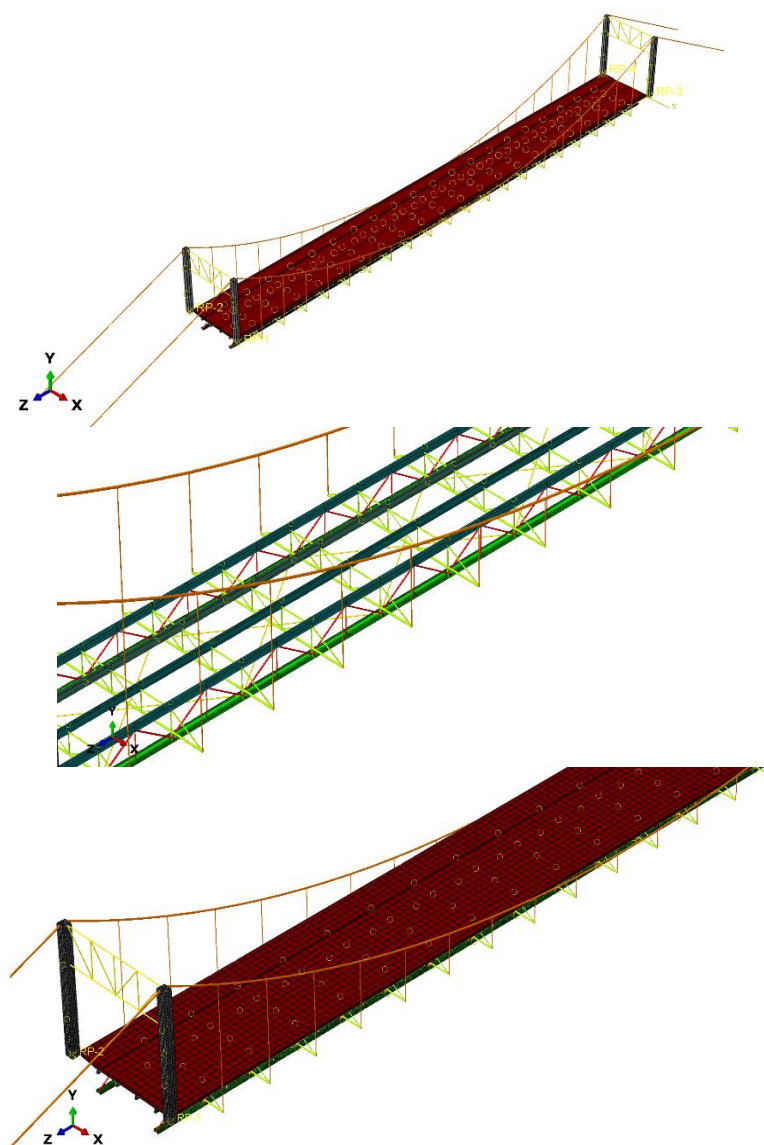
اجزا	نوع المان	اندازه تقریبی (سانتیمتر)
عرشه بتنی	C3D8R	۵۰
دکل	C3D8R	۱۵
کابل و آویزه‌ها	T3D2	به اندازه طول عضو
خرپای فولادی	T3D2	به اندازه طول عضو
مقاطع I-شکل طولی	C3D8R	۱۵

مشخصات مکانیکی اجزای مختلف پل و مقاطع استفاده شده در جدول (۱) آورده شده است. از آنجاکه در شبیه‌سازی اتصالات خرپای فلزی، اجزای اتصال مدل نمی‌شود، و فقط نوع اتصال تعریف می‌شود، وزن صفحات اتصال‌ها به صورت افزایش چگالی از ۸۰۰۰ به ۹۰۰۰ کیلوگرم در مترمکعب، در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود خطوط لوله، نرده و آسفالت و عدم نیاز به مدل‌سازی آن‌ها، وزن آن‌ها به ترتیب ۲۵، ۳۷۵، ۱۲۶ کیلو نیوتن در نظر گرفته شده و به عرشه اعمال شده است.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی عرشه، دکل و تیرهای I-شکل از المان‌های سه‌بعدی و برای خرپا از المان‌های دوبعدی استفاده شده است. در قسمت‌های با هندسه منحنی و یا نامنظم، مش بندی پیچیده‌تر شده و معمولاً در این قسمت‌ها از مش ریزتر استفاده شده است.

جدول (۱). مشخصات مکانیکی مصالح

مصالح	چگالی (kg / m^3)	مدول الاستیسیته (N / m^2)	نسبت پواسن
کابل‌های فولادی	۸۰۰۰	۱۳۵	۰/۳
آویزه‌های فولادی	۸۰۰۰	۱۳۵	۰/۳



شکل (۳). هندسه و مش بندی اجزا

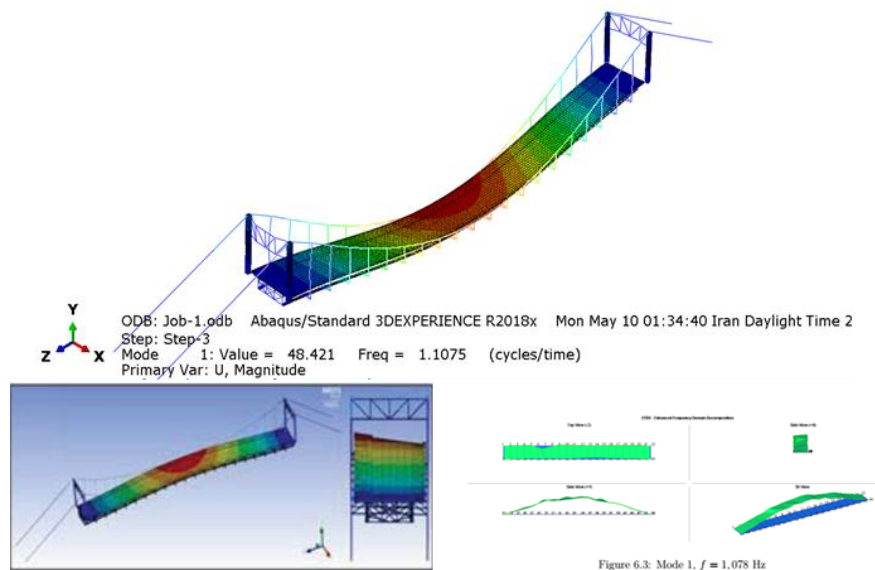
خرپا به مقاطع I-شکل از اتصال مفصلی موجود در نرم افزار استفاده شده است.

در نهایت در این شبیه سازی سه گام تحلیلی تعریف شده است. در گام اولیه، کشش کابل و یا همان نیروی پیش تنیدگی اعمال شده است. در گام بعدی از گام تحلیلی استاتیکی (ضمنی) برای اعمال وزن اجسام، و در گام آخر از تحلیل فرکانسی برای استخراج فرکانس و شکل های مودی استفاده شده است. در شکل های زیر نتایج ۲ مود اول، با نتایج میدانی و نتایج مرجع [۲۱] مقایسه شده است. همچنین این مقایسه به طور کامل در جدول (۳) برای فرکانس های ۵ مود اول آمده است.

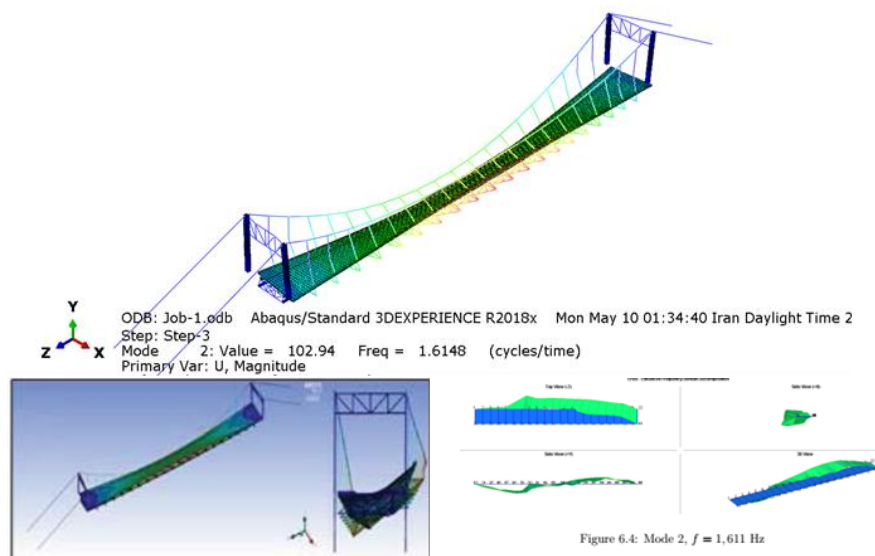
با توجه به عدم وجود بارهای طراحی روی پل و همچنین رفتار برگشت پذیر پل هنگام اعمال ارتعاش آزاد به پل، از رفتار خطی برای مصالح استفاده شده است. همچنین می توان گفت که فرکانس هر سیستم به سختی و جرم آن بستگی دارد که در همه سامانه ها معمولاً از سختی اولیه استفاده می شود.

در این مقاله از داده های مشخصات مکانیکی جدول (۱) برای تعریف خصوصیات مکانیکی تعریف شده است. همچنین برای تعریف رفتار کششی کابل ها، از گزینه **No compression** استفاده شده است.

در قسمت اندرکنش اجزا، برای تعریف اتصالات خرپا و اتصال



مود اول



مود دوم

شکل (۴). مقایسه نتایج تحلیل فرکانسی به روش‌های مختلف

جدول (۳). نتایج استخراج فرکانس‌های پل آلفوسا با روش‌های مختلف

فرکانس	روش شبیه‌سازی	استخراج در محل [۳۲]	نتایج کار عددی [۲۳]
مود اول	۱/۱۰۷۷	۱/۰۷۸	۱/۰۷۱
مود دوم	۱/۶۱۴۸	۱/۶۰۸	۱/۶۱۱
مود سوم	۱/۶۴۱۹	۱/۷۰۹	۱/۷۱۳
مود چهارم	۱/۹۱۲۷	۲/۰۷۳	۲/۳۵۲
مود پنجم	۲/۵۶۵۵	۲/۷۹۱	۲/۸۳۱

۳-۱. شبیه‌سازی پل سگمنتال امام خمینی (ره)

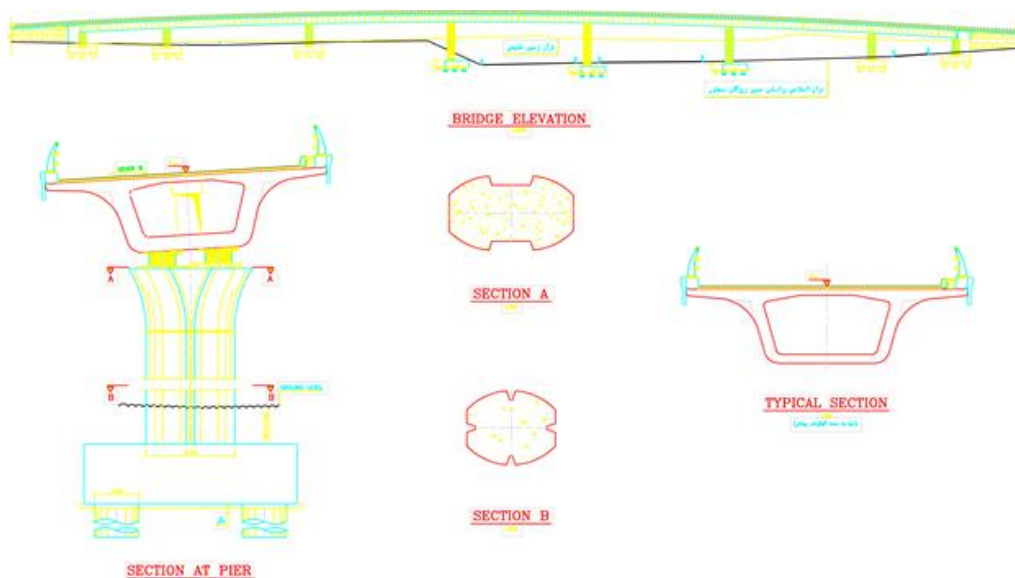
از آنجاکه این تقاطع غیر هم‌سطح مجموعه‌ای از پل‌های جدا از هم است، برای این شبیه‌سازی، پل مسیر غرب به شمال انتخاب شده است. پلان این مسیر در شکل (۵-الف) بارنگ آبی نشان داده شده است. نما، مقطع عرشه و ستون‌ها نیز در شکل (۵-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مسیر غرب به شمال دارای ۸ ستون با ارتفاع متغیر است. مقطع همه ستون‌ها مشابه و در ارتفاع متغیر هستند. درواقع می‌توان گفت که

اتصال سرستون به ستون به صورت یکپارچه اجرا شده است.

همان‌طور که در شکل‌های فوق نشان داده شد، دقت قابل‌قبولی میان نتایج حاصل از روش شبیه‌سازی این پژوهش، نتایج حاصل از استخراج مود از محل و کار عددی مرجع [۲۱] وجود دارد.



الف) پلان مسیر پل



ب) نما و مقاطع استفاده شده در پل

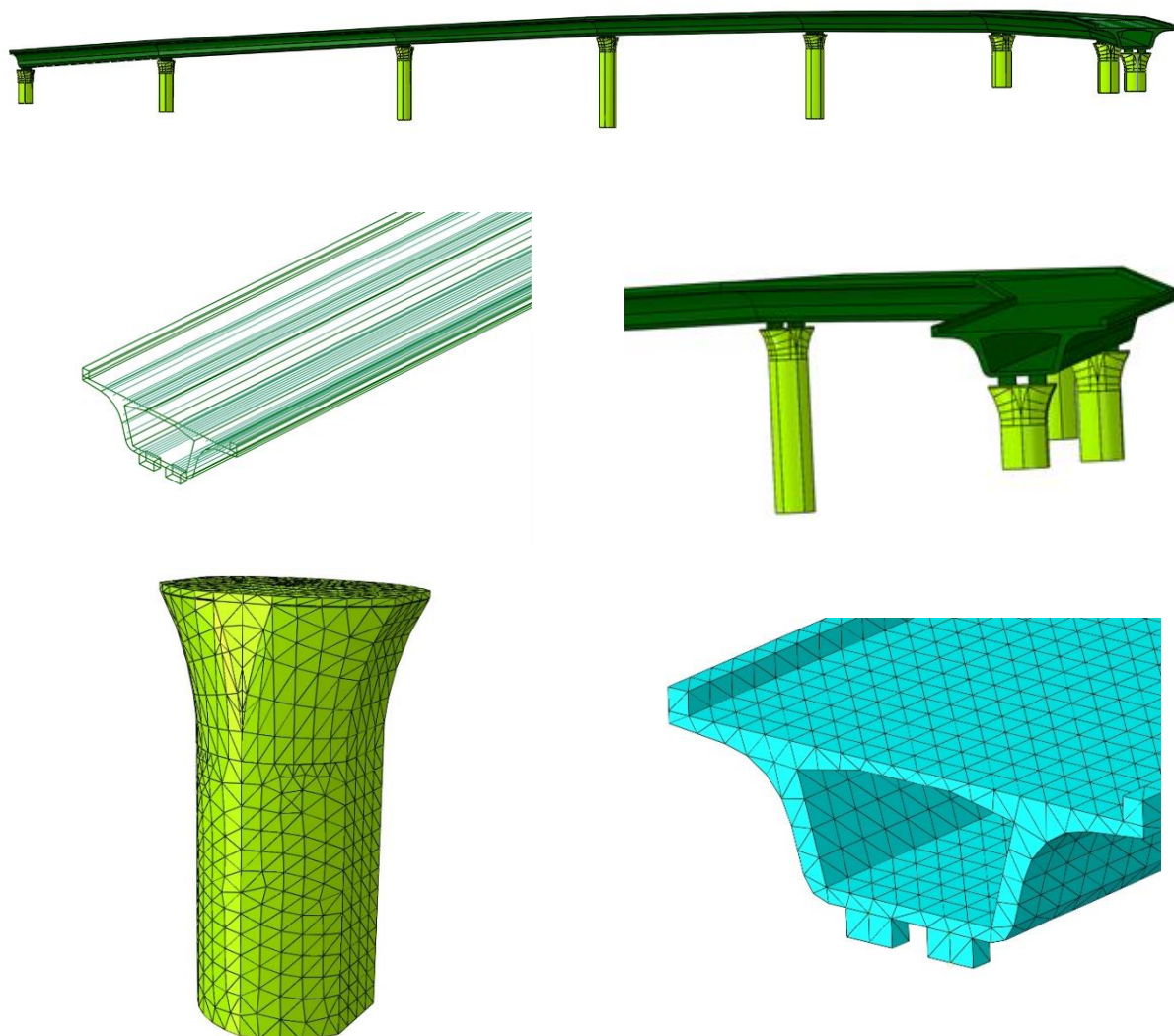
شکل (۵). پلان و نمای مسیر پل و مقاطع استفاده

برای کنترل نوسان حرکت طولی پل به علت نوسان دمایی و شرایط محیطی است. اما بار عرشه از طریق دو جداساز به سرستون‌ها منتقل می‌شود و از طرفی سختی قائم آن‌ها نسبت به سرستون‌ها کمتر است. پس در نظر گرفتن آن‌ها به عنوان عامل تأثیرگذار بر مودهای ارتعاشی پل لازم است.

از آنجاکه کف ستون‌ها به شمع‌ها متصل شده است و شمع‌ها نیز به زمین سخت متصل شده‌اند، تکیه‌گاه ستون را می‌توان گیردار فرض کرد. از طرفی استخراج مودهای سازه، مربوط به سیستم رو سازه است و نیازی به در نظر گرفتن فونداسیون و شمع‌ها نیست. شکل (۶) مدل پل و مش بندی اجزا را نشان می‌دهد.

مقطع عرشه نیز صندوقه‌هایی به شکل دوزنقه است که در نهایت با عبور کابل از پیرامون آن‌ها، به هم فشرده می‌شوند. کابل‌ها رشته بافته شده ۷ سیمی به قطر ۱۵/۲۴ میلی‌متر هستند که به دو صورت کابل‌های ایزو استاتیک و پیوستگی استفاده می‌شوند. کابل‌های ایزو استاتیک از ۹، ۶ و ۱۲ و کابل‌های پیوستگی از ۱۲ عدد رشته بافته شده تشکیل شده‌اند.

برای شبیه‌سازی صندوقه و ستون‌ها از المان‌های سه‌بعدی، و برای کابل‌های پیش‌تنیدگی از المان‌های خطی استفاده شده است. جداسازها نیز مطابق با ابعاد داده شده به صورت سه‌بعدی مدل شده‌اند. در اینجا باید به این نکته دقت شود که وجود جداسازها



شکل (۶). نمای کلی مدل و مش بندی اجزا

۲۵	۳۱/۹۷۵	بتن
۷۸/۵	۱۸۶	کابل
۱/۵	۰/۱۰۸	جداساز

اجزای غیرسازه‌ای یعنی آسفالت و نرده‌ها در شبیه‌سازی نیستند ولی وزن آن‌ها اعمال شده است. وزن مخصوص آسفالت حدود ۲۳ kN/m^3 و وزن نرده لبه‌های عرشه به‌اندازه $۰/۱ \text{ kN/m}$ اعمال شده است.

با توجه به نوع شبیه‌سازی کابل، اندرکنش **EMBEDDED** بین کابل و صندوقه تعریف شده است. اندرکنش بعدی بین جداساز و ستون است که از نوع **TIE** است.

با توجه به قطر کابل‌ها مقدار نیروی پیش‌تنیدگی آن‌ها نیز متفاوت است و مقادیر آن‌ها در جدول ۹-۴ آمده است.

در این شبیه‌سازی سه‌گام تحلیلی تعریف شده است. در گام اولیه، کشش کابل و یا همان نیروی پیش‌تنیدگی اعمال شده است. در

مقاومت بتن مصرفی در صندوقه‌ها و ستون‌ها ۴۰ مگاپاسکال است. مطابق بند ۹-۳-۶ مبحث نهم مقررات ملی ایران و با فرض چگالی ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسته از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (۴)$$

$$E_c = 0.043 \times 2400^{1.5} \sqrt{40} = 31975 \text{ MPa}$$

سایر مشخصات مکانیکی مصالح استفاده شده در پل در جدول (۴) به‌طور کامل ذکر شده است.

جدول (۴). مشخصات مکانیکی مصالح پل

وزن مخصوص ($\frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$)	مدول الاستیک (GPa)	مصالح
---	----------------------------------	-------

تعریف می‌شود. طول پل سگمنتال تقاطع غیر هم‌سطح امام خمینی (ره) حدود ۳۰۰ متر است. با در نظر گرفتن بازه‌های به طول ۱۵ متر، پل به ۲۰ ناحیه تقسیم‌بندی شده، و در این ۲۰ ناحیه، باید به دنبال محل آسیب گشت (شکل (۸)).

قرائت اشکال مودی بهتر است در نقاطی باشد که بتواند تخمین قابل‌قبولی از تغییر شکل آن مود باشد. در غیر این صورت تعداد نقاط باید افزایش یابد. در این پژوهش منحنی تغییر شکل بین دو ستون (تکیه‌گاه) با سه‌نقطه تقریب زده شده است. نکته مهمی که باید به آن توجه داشت، حتی‌المقدور یکی از این سه‌نقطه در نزدیکی قله شکل مودی باشد (حداقل سه‌نقطه برای تقریب منحنی نیاز است).

برای ستون‌ها نیز ۶ بازه در نظر گرفته شده است (شکل (۸)). با توجه به طول متغیر ستون‌ها، طول بازه‌ها نیز متغیر است. به‌طور مثال طول بازه‌ها برای ستون چهارم حدود ۲/۱ متر است. در نهایت تعریف آسیب طی سناریوهای مختلفی صورت می‌گیرد. برای این پل سناریوهای مختلف آسیب عبارت‌اند از:

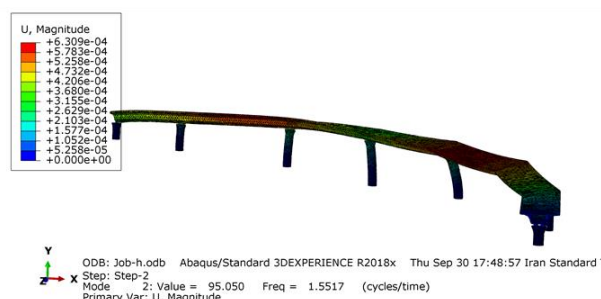
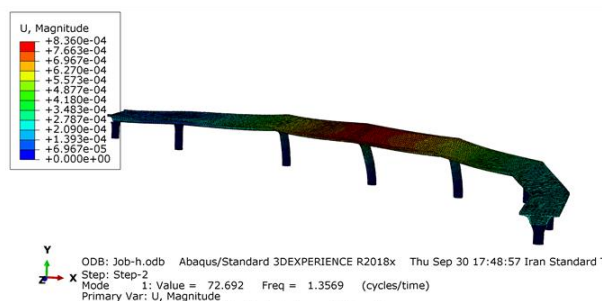
- آسیب در عرشه: کاهش سختی معادل صندوقه در بازه ۷ به‌اندازه ۳۰ درصد.
- آسیب در عرشه: کاهش سختی معادل صندوقه در بازه‌های ۷ و ۱۶ به‌اندازه ۳۰ درصد.
- آسیب در ستون: کاهش سختی معادل ستون چهارم در بازه ۳ به‌اندازه ۳۰ درصد.

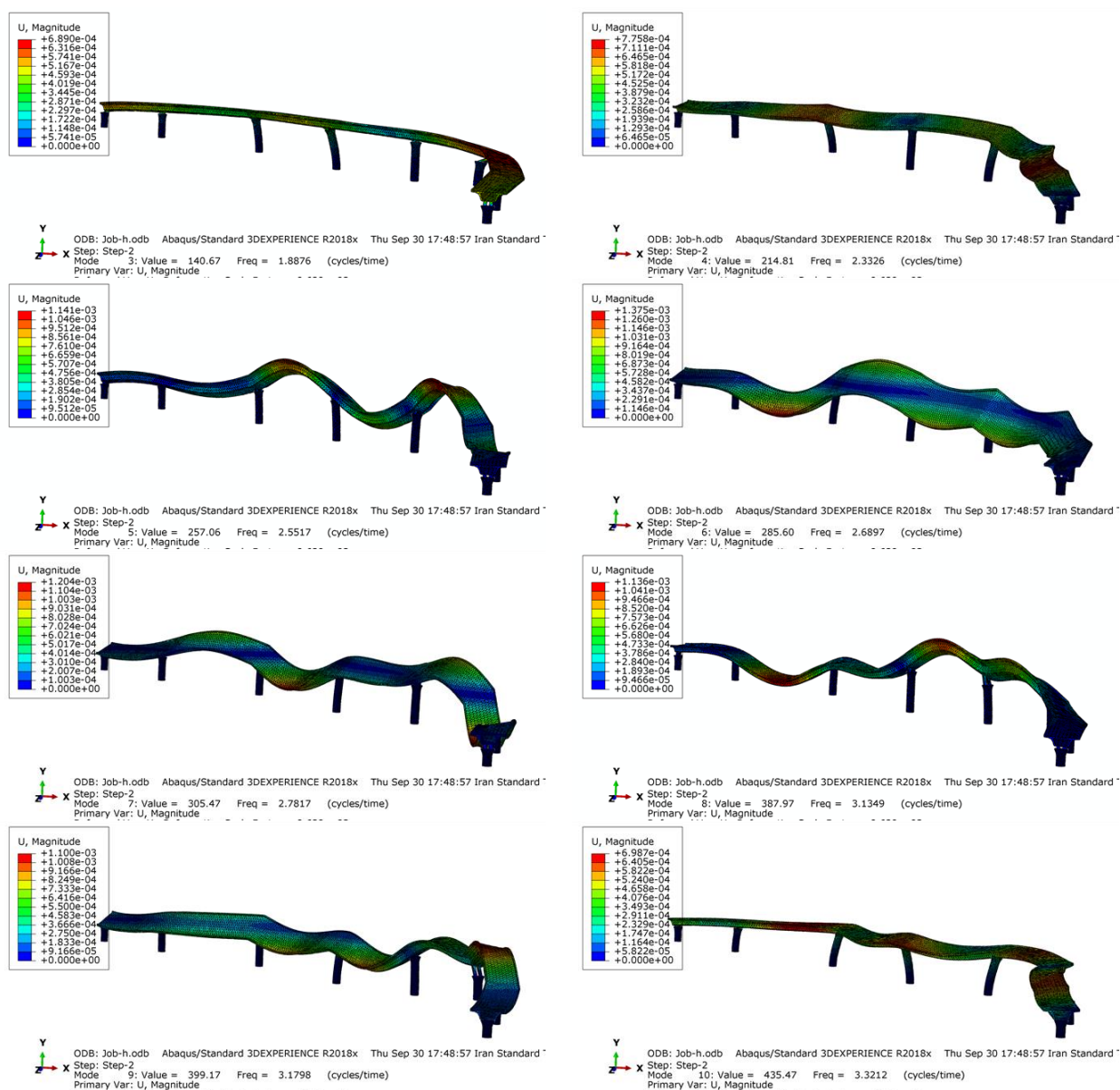
گام بعدی از گام تحلیلی استاتیکی (ضمنی) برای اعمال وزن اجسام، و در گام آخر از تحلیل فرکانسی برای استخراج فرکانس و شکل‌های مودی استفاده شده است. باید توجه داشت که ریز فرکانس‌های زیادی ممکن است در نتایج تحلیل فرکانسی استخراج شوند و کاربردی نداشته باشند. با توجه به توضیحات فوق برای گام تحلیلی مربوط به استخراج فرکانس‌ها، بهترین روش فعال‌سازی گزینه AMS است. در این حالت با تعریف بازه فرکانس، فرکانس‌های موردنظر به‌راحتی استخراج می‌شوند. این بازه برای پل‌ها از حدود ۱ تا ۳ است. در شکل (۷) چند مود از این سازه نشان داده شده است.

۴-۱. تعریف سناریوی آسیب

به‌طور کلی آسیب با کاهش سختی همراه است و با کاهش مدول الاستیسیته شبیه‌سازی می‌شود. برای پل سگمنتال می‌توان آسیب را در کابل‌های پیش‌تنیده، باکس‌های بتنی عرشه و ستون‌ها متصور شد. در این راستا آسیب به‌صورت کاهش سختی معادل در عرشه، و ستون در نظر گرفته شده است. از آنجاکه کاهش نیروی پیش‌تندگی در کابل‌ها منجر به کاهش سختی عرشه می‌شود، کاهش نیروی پیش‌تندگی و سختی خود عرشه، به‌صورت معادل در نظر گرفته شده است. درواقع آسیب در کابل که همان کاهش نیروی پیش‌تندگی است، باعث کاهش سختی در دهانه متناظر با آن می‌شود. پس از استخراج فرکانس‌های سازه سالم، نوبت به تعریف سناریوهای مختلف آسیب در پل و استخراج

فرکانس‌های متناظر با آن می‌رسد. برای یافتن محل آسیب در ابتدا باید سازه به بازه‌های منظم و با حفاصل مشابه تقسیم شود. به این صورت که آسیب به‌صورت کاهش سختی در آن بازه

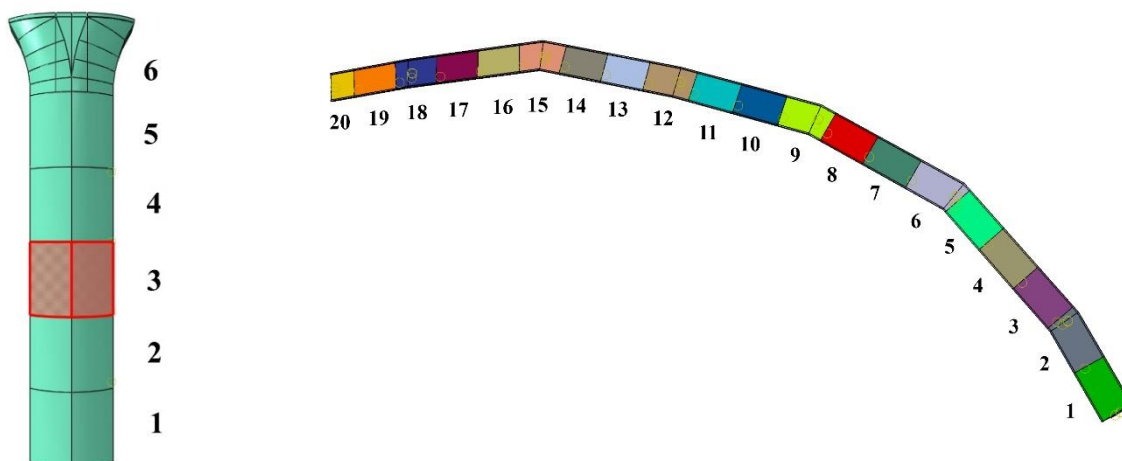




شکل (۷). ده مود اول استخراجی سازه

مودی سازه آسیب‌دیده صرف‌نظر شده است.

پس از تعریف سناریوهای مختلف آسیب، فرکانس‌های سازه پل در شرایط سالم و آسیب‌دیده به‌قرار جدول (۵) استخراج‌شده‌اند. از آنجاکه شکل‌های مودی سازه آسیب‌دیده در سناریوهای مختلف شبیه به هم و مشابه شکل (۷) هستند، از نشان دادن شکل



شکل (۸). تعریف بازه‌های عرشه و ستون

جدول (۵). فرکانس‌های سازه سالم و آسیب‌دیده

فرکانس مود اول	سازه سالم	سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم
۱/۳۵۶۹	۱/۳۵۴۹	۱/۳۵۲۹	۱/۳۵۱۸	فرکانس مود اول
۱/۵۵۱۷	۱/۵۴۷۸	۱/۵۴۴۰	۱/۵۴۷	فرکانس مود دوم
۱/۸۸۷۶	۱/۸۸۲۹	۱/۸۸۲۴	۱/۸۸۶۸	فرکانس مود سوم
۲/۳۳۲۶	۲/۳۲۳۳	۲/۳۰۹۲	۲/۳۲۸۹	فرکانس مود چهارم
۲/۵۵۱۷	۲/۴۶۶۵	۲/۴۶۰۶	۲/۵۵۱۶	فرکانس مود پنجم
۲/۶۸۹۷	۲/۶۷۶۲	۲/۵۹۸۰	۲/۶۸۹۳	فرکانس مود ششم
۲/۷۸۱۷	۲/۷۶۱۷	۲/۷۵۶۱	۲/۷۸۱۵	فرکانس مود هفتم
۳/۱۳۴۹	۳/۱۲۰۱	۳/۰۸۱۹	۳/۱۳۴۲	فرکانس مود هشتم
۳/۱۷۹۸	۳/۱۶۲۰	۳/۱۵۶۳	۳/۱۷۹۷	فرکانس مود نهم
۳/۳۲۱۲	۳/۲۸۲۸	۳/۲۴۳۷	۳/۳۱۹۶	فرکانس مود دهم

۳. نتایج و بحث

است. اما با توجه به نیاز پایش سلامت ستون‌ها، ضروری است که ماتریس نرمی ستون‌ها نیز استخراج شود. با توجه به منفصل بودن ستون‌ها و تعامد بین تغییر شکل‌های خمشی ستون و عرشه، می‌توان ماتریس نرمی را برای هر ستون جداگانه به دست آورد. در این پژوهش، مؤلفه‌های شکل مودی در ۶ نقطه روی ستون چهارم و در ۶ مود (در جهت عمود بر محور ستون) در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه ماتریس نرمی سازه، مودهای ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ استفاده شده‌اند. در مودهای اولیه، به دلیل سختی جانبی کم، تغییر شکل در جهت عرضی است. اما از آنجا که بارگذاری سازه به صورت قائم است، مودهای با تغییر شکل غالب قائم در نظر گرفته شده‌اند. مطابق با توضیحات فوق ماتریس‌های زیر برای تشکیل ماتریس نرمی سازه سالم استخراج شده‌اند.

قبل از بررسی سناریوها ابتدا باید ماتریس نرمی سازه سالم را محاسبه کرد و برای تمامی سناریوها ملاک عمل قرار گیرد. دقت ماتریس نرمی به تعداد نقاط اندازه‌گیری شکل مودی و تعداد مودها بستگی دارد. با توجه به رابطه ماتریس تشکیل نرمی (رابطه (۲)) می‌توان گفت که ابعاد ماتریس به تعداد نقاط اندازه‌گیری بستگی دارد و تعداد مودهای بیشتر، دقت ماتریس نرمی را افزایش می‌دهد. از طرفی دیگر در هر نقطه ۳ مؤلفه شکل مودی وجود دارد، که مطابق با نتایج پژوهش در سال ۲۰۲۰ [۲۱]، مؤلفه قائم (در جهت بارگذاری پل) بیشترین تأثیر در پایش سلامت عرشه پل دارد. بنابراین فقط مؤلفه‌های قائم (در جهت تغییر شکل خمشی عرشه) در نظر گرفته شده است.

با توجه به شکل (۸) عرشه پل به ۲۰ قسمت تقسیم شد و برای تشکیل ماتریس نرمی، مقدار شکل مودی در مرکز هر قسمت قرائت می‌شود. پس ماتریس نرمی 20×20 خواهد بود. تأثیر سختی ستون‌ها با مدل‌سازی آن، روی عرشه پل دیده شده

$$[\phi](deck) = \begin{bmatrix} -0.02287 & 0.063404 & -0.00195 & 0.086005 & -0.00446 & -0.11145 \\ -0.03001 & 0.019317 & -0.03042 & -0.01498 & 0.031473 & 0.004806 \\ -0.02514 & -0.27358 & -0.16738 & -0.59338 & 0.200469 & 0.629893 \\ -0.02737 & -0.47923 & -0.27906 & -0.99515 & 0.31769 & 1.00071 \\ -0.03817 & -0.24068 & -0.20108 & -0.58726 & 0.222102 & 0.581381 \\ -0.19537 & 0.498261 & -0.21664 & 0.10562 & 0.302213 & 0.210977 \\ -0.41352 & 1.18731 & -0.4286 & 0.353612 & 0.578529 & 0.335185 \\ -0.2775 & 0.801102 & -0.32297 & 0.187834 & 0.405697 & 0.225963 \\ 0.025703 & -0.15861 & -0.20271 & 0.015672 & 0.322859 & -0.30178 \\ 0.084093 & -0.56018 & -0.54482 & -0.08874 & 0.711409 & -0.8439 \\ 0.05936 & -0.42718 & -0.45059 & -0.05744 & 0.572695 & -0.68392 \\ -0.04611 & 0.136133 & 0.187304 & -0.2993 & -0.12602 & -0.20997 \\ -0.19558 & 0.536482 & 0.529405 & -0.86219 & -0.51189 & -0.3754 \\ -0.18526 & 0.469957 & 0.452556 & -0.79524 & -0.44628 & -0.38072 \\ -0.05167 & 0.013151 & -0.28792 & -0.0233 & -0.42747 & -0.01022 \\ -0.07917 & -0.10672 & -0.92626 & 0.187018 & -0.95494 & 0.090658 \\ -0.06314 & -0.11278 & -0.92022 & 0.211498 & -0.99394 & 0.114285 \\ -0.0447 & -0.01771 & -0.36836 & 0.022024 & -0.39973 & -0.0119 \\ -0.06864 & 0.064285 & -0.011 & -0.16806 & 0.040559 & -0.17265 \\ -0.05399 & 0.045322 & 0.030601 & -0.12436 & 0.074159 & -0.13186 \end{bmatrix}$$

$$[\phi](deck) = \begin{bmatrix} -0.01425 & 0.058084 & -0.00232 & 0.100714 & 0.02927 & -0.10592 \\ -0.02671 & 0.018294 & -0.03639 & -0.00768 & 0.032469 & 0.010831 \\ -0.05965 & -0.24358 & -0.20043 & -0.63463 & 0.022072 & 0.63212 \\ -0.08953 & -0.42157 & -0.33455 & -1.06178 & 0.033209 & 1.00237 \\ -0.07023 & -0.20469 & -0.24433 & -0.61007 & 0.064161 & 0.59497 \\ -0.12286 & 0.43177 & -0.2757 & 0.195687 & 0.290279 & 0.302307 \\ -0.23399 & 0.987874 & -0.53541 & 0.539525 & 0.568999 & 0.502509 \\ -0.16566 & 0.706371 & -0.41871 & 0.347446 & 0.421325 & 0.357359 \\ 0.008732 & -0.20223 & -0.16175 & 0.007258 & 0.375936 & -0.24026 \\ 0.022234 & -0.66892 & -0.42681 & -0.13446 & 0.841196 & -0.72559 \\ 0.013743 & -0.52214 & -0.35602 & -0.09121 & 0.678429 & -0.59019 \\ -0.03669 & 0.219369 & 0.108276 & -0.28576 & -0.09099 & -0.25216 \\ -0.15224 & 0.78983 & 0.268817 & -0.78524 & -0.43776 & -0.50713 \\ -0.14803 & 0.698048 & 0.217536 & -0.72368 & -0.37124 & -0.49593 \\ -0.04946 & -0.01346 & -0.29943 & 0.040132 & -0.40913 & -0.10351 \\ -0.084 & -0.25305 & -0.88315 & 0.335822 & -0.92803 & -0.10949 \\ -0.06846 & -0.26249 & -0.87267 & 0.3581 & -0.97168 & -0.09543 \\ -0.04475 & -0.06551 & -0.36517 & 0.08946 & -0.37818 & -0.095 \\ -0.06402 & 0.095837 & -0.05125 & -0.14535 & 0.077973 & -0.158 \\ -0.05107 & 0.074341 & 0.001316 & -0.1151 & 0.100628 & -0.11089 \end{bmatrix}$$

$$[\Lambda]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.068636 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.064468 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.059416 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.057694 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.051037 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.050391 \end{bmatrix}$$

$$[\Lambda]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.068341 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.062445 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.059195 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.057279 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.050874 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.050074 \end{bmatrix}$$

در نهایت با استفاده از رابطه (۲) ماتریس نرمی عرشه به فرم زیر

به دست می‌آید:

$$[F]_{d1} = 10^{-3} \times \begin{bmatrix} 1.349 & 0.021 & -7.587 & -12.514 & -7.130 & 1.639 & 5.293 & 3.318 & 1.034 & 1.779 & 1.639 & 0.330 & 0.385 & 0.453 & 0.207 & 0.432 & 0.379 & 0.308 & 0.498 & 0.373 \\ 0.021 & 0.206 & 1.001 & 1.577 & 1.148 & 1.860 & 3.810 & 2.697 & 0.548 & 1.129 & 0.964 & -0.069 & -0.054 & 0.027 & -0.026 & 0.031 & -0.099 & 0.072 & 0.410 & 0.307 \\ -7.587 & 1.001 & 48.892 & 80.357 & 47.141 & -0.123 & -11.512 & -5.546 & -2.043 & -1.316 & -1.970 & -1.892 & -2.026 & -1.896 & -1.180 & -2.065 & -2.533 & -1.169 & -0.217 & -0.180 \\ -12.514 & 1.577 & 80.357 & 132.233 & 77.477 & -1.960 & -22.818 & -11.685 & -2.670 & 0.257 & -1.348 & -2.672 & -2.713 & -2.451 & -1.644 & -2.846 & -3.635 & -1.607 & -0.074 & -0.113 \\ -7.130 & 1.148 & 47.141 & 77.477 & 45.684 & 1.397 & -7.822 & -2.990 & -0.897 & 1.328 & 0.257 & -1.668 & -1.724 & -1.482 & -0.984 & -1.576 & -2.175 & -0.833 & 0.410 & 0.264 \\ 1.639 & 1.860 & -0.123 & -1.960 & 1.397 & 28.962 & 63.842 & 43.416 & -0.963 & -10.648 & -7.505 & -3.420 & -4.100 & -4.022 & -3.069 & -3.757 & -1.386 & 0.893 & 0.770 \\ 5.293 & 3.810 & -11.512 & -22.818 & -7.822 & 63.842 & 143.490 & 97.047 & -2.953 & -26.449 & -18.721 & -6.415 & -5.911 & -6.126 & -3.464 & -5.183 & -6.509 & -2.261 & 2.002 & 1.648 \\ 3.318 & 2.697 & -5.546 & -11.685 & -2.990 & 43.416 & 97.047 & 65.865 & -1.373 & -15.918 & -11.098 & -3.929 & -2.944 & -3.078 & -2.031 & -2.943 & -3.950 & -1.168 & 1.891 & 1.468 \\ 1.034 & 0.548 & -2.043 & -2.670 & -0.897 & -0.963 & -2.953 & -1.373 & 14.032 & 36.914 & 29.685 & -2.883 & -15.713 & -12.866 & -3.667 & -4.837 & -5.799 & -1.847 & 2.496 & 2.187 \\ 1.779 & 1.129 & -1.316 & 0.257 & 1.328 & -10.648 & -26.449 & -15.918 & 36.914 & 100.523 & 80.527 & -5.360 & -35.849 & -28.633 & -6.419 & -6.104 & -8.534 & -1.814 & 7.313 & 5.998 \\ 1.639 & 0.964 & -1.970 & -1.348 & 0.257 & -7.505 & -18.721 & -11.098 & 29.685 & 80.527 & 64.569 & -4.407 & -28.912 & -23.101 & -4.929 & -4.241 & -6.206 & -1.179 & 5.937 & 4.837 \\ 0.330 & -0.069 & -1.892 & -2.672 & -1.668 & -3.420 & -6.415 & -3.929 & -2.883 & -5.360 & -4.407 & 11.626 & 33.371 & 30.378 & 0.334 & -9.041 & -9.500 & -1.797 & 5.127 & 3.975 \\ 0.385 & -0.054 & -2.026 & -2.713 & -1.724 & -4.100 & -5.911 & -2.944 & -15.713 & -35.849 & -28.912 & 33.371 & 101.195 & 91.395 & 4.612 & -17.833 & -18.714 & -2.026 & 13.365 & 9.998 \\ 0.453 & 0.027 & -1.896 & -2.451 & -1.482 & -4.022 & -6.126 & -3.078 & -12.866 & -28.633 & -23.101 & 30.378 & 91.395 & 82.717 & 4.315 & -15.702 & -16.615 & -1.550 & 12.624 & 9.429 \\ 0.207 & -0.026 & -1.180 & -1.644 & -0.984 & -2.022 & -3.464 & -2.031 & -3.667 & -6.419 & -4.929 & 0.334 & 4.612 & 4.315 & 14.482 & 36.571 & 37.212 & 15.142 & -0.084 & -1.676 \\ 0.432 & 0.031 & -2.065 & -2.846 & -1.576 & -3.069 & -5.183 & -2.943 & -4.837 & -6.104 & -4.241 & -9.041 & -17.833 & -15.702 & 36.571 & 101.114 & 103.009 & 40.302 & -4.443 & -7.261 \\ 0.379 & -0.099 & -2.533 & -3.635 & -2.175 & -3.757 & -6.509 & -3.950 & -5.799 & -8.534 & -6.206 & -9.500 & -18.714 & -16.615 & 37.212 & 103.009 & 105.066 & 40.940 & -4.671 & -7.807 \\ 0.308 & 0.072 & -1.169 & -1.607 & -0.833 & -1.386 & -2.261 & -1.168 & -1.847 & -1.814 & -1.179 & -1.797 & -2.026 & -1.550 & 15.142 & 40.302 & 40.940 & 16.410 & -0.560 & -2.148 \\ 0.498 & 0.410 & -0.217 & -0.074 & 0.410 & 0.893 & 2.002 & 1.891 & 2.496 & 7.313 & 5.937 & 5.127 & 13.365 & 12.624 & -0.084 & -4.043 & -4.671 & -0.560 & 3.812 & 2.929 \\ 0.373 & 0.307 & -0.180 & -0.113 & 0.264 & 0.770 & 1.648 & 1.468 & 2.187 & 5.998 & 4.837 & 3.975 & 9.998 & 9.429 & -1.676 & -7.261 & -7.807 & -2.148 & 2.929 & 2.437 \end{bmatrix}$$

حال شاخص آسیب را برای سناریو اول و مطابق رابطه (۳) را می‌توان به‌صورت زیر به دست آورد:

$$[DFI] = 10^{-3} \times \begin{bmatrix} -0.062 & -0.023 & 0.192 & 0.274 & 0.090 & -0.042 & 0.114 & -0.199 & -0.122 & -0.158 & -0.117 & -0.040 & -0.099 & -0.096 & -0.004 & 0.010 & 0.019 & -0.005 & -0.034 & -0.020 \\ -0.023 & -0.005 & 0.080 & 0.109 & 0.030 & -0.009 & 0.126 & -0.051 & -0.041 & -0.041 & -0.022 & 0.008 & -0.002 & -0.008 & 0.004 & 0.004 & 0.011 & -0.006 & -0.034 & -0.025 \\ 0.192 & 0.080 & -0.537 & -0.751 & -0.239 & -0.109 & -0.725 & 0.401 & 0.444 & 0.671 & 0.525 & 0.276 & 0.556 & 0.508 & 0.056 & -0.019 & -0.029 & 0.003 & 0.001 & -0.029 \\ 0.274 & 0.109 & -0.751 & -0.980 & -0.255 & -0.567 & -2.218 & 0.087 & 0.722 & 1.152 & 0.871 & 0.454 & 0.909 & 0.834 & 0.097 & -0.023 & -0.035 & 0.011 & 0.002 & -0.047 \\ 0.090 & 0.030 & -0.239 & -0.255 & -0.057 & -0.777 & -2.036 & -0.692 & 0.405 & 0.884 & 0.682 & 0.349 & 0.626 & 0.575 & 0.097 & 0.040 & 0.048 & 0.024 & -0.040 & -0.059 \\ -0.042 & -0.009 & -0.109 & -0.567 & -0.777 & 0.733 & 4.448 & 0.620 & -0.073 & 0.676 & 0.816 & 0.488 & 0.657 & 0.565 & 0.198 & 0.234 & 0.283 & 0.066 & -0.195 & -0.159 \\ 0.114 & 0.126 & -0.725 & -2.218 & -2.036 & 4.448 & 16.050 & 5.627 & -0.525 & -0.294 & 0.456 & 0.708 & 1.150 & 0.929 & 0.293 & 0.335 & 0.394 & 0.065 & -0.348 & -0.279 \\ -0.199 & -0.051 & 0.401 & 0.087 & -0.692 & 0.620 & 5.627 & 0.113 & -0.266 & 0.890 & 1.100 & 0.812 & 1.241 & 1.081 & 0.404 & 0.547 & 0.632 & 0.190 & -0.283 & -0.239 \\ -0.122 & -0.041 & 0.444 & 0.722 & 0.405 & -0.073 & -0.525 & -0.266 & -0.159 & -0.395 & -0.364 & -0.229 & -0.476 & -0.445 & -0.112 & -0.147 & -0.142 & -0.091 & -0.078 & -0.041 \\ -0.158 & -0.041 & 0.671 & 1.152 & 0.884 & 0.676 & -0.294 & 0.890 & -0.395 & -1.633 & -1.478 & -0.874 & -1.573 & -1.460 & -0.415 & -0.536 & -0.569 & -0.288 & -0.078 & -0.008 \\ -0.117 & -0.022 & 0.525 & 0.871 & 0.682 & 0.816 & 0.456 & 1.100 & -0.364 & -1.478 & -1.306 & -0.742 & -1.332 & -1.241 & -0.361 & -0.476 & -0.504 & -0.256 & -0.078 & -0.015 \\ -0.040 & 0.008 & 0.276 & 0.454 & 0.349 & 0.488 & 0.708 & 0.812 & -0.229 & -0.874 & -0.742 & -0.448 & -0.835 & -0.775 & -0.230 & -0.306 & -0.324 & -0.157 & -0.031 & 0.002 \\ -0.099 & -0.002 & 0.556 & 0.909 & 0.626 & 0.657 & 1.150 & 1.241 & -0.476 & -1.573 & -1.332 & -0.835 & -1.567 & -1.446 & -0.409 & -0.517 & -0.550 & -0.261 & -0.026 & 0.027 \\ -0.096 & -0.008 & 0.508 & 0.834 & 0.575 & 0.565 & 0.929 & 1.081 & -0.445 & -1.460 & -1.241 & -0.775 & -1.446 & -1.334 & -0.377 & -0.475 & -0.506 & -0.239 & -0.017 & 0.030 \\ -0.004 & 0.004 & 0.056 & 0.097 & 0.097 & 0.198 & 0.293 & 0.404 & -0.112 & -0.415 & -0.361 & -0.230 & -0.409 & -0.377 & -0.148 & -0.235 & -0.251 & -0.106 & 0.010 & 0.021 \\ 0.010 & 0.004 & -0.019 & -0.023 & 0.040 & 0.234 & 0.335 & 0.547 & -0.147 & -0.536 & -0.476 & -0.306 & -0.517 & -0.475 & -0.235 & -0.412 & -0.441 & -0.177 & 0.036 & 0.046 \\ 0.019 & 0.011 & -0.029 & -0.035 & 0.048 & 0.283 & 0.394 & 0.632 & -0.142 & -0.569 & -0.504 & -0.324 & -0.550 & -0.506 & -0.251 & -0.441 & -0.472 & -0.191 & 0.034 & 0.046 \\ -0.005 & -0.006 & 0.003 & 0.011 & 0.024 & 0.066 & 0.065 & 0.190 & -0.091 & -0.288 & -0.256 & -0.157 & -0.261 & -0.239 & -0.106 & -0.177 & -0.191 & -0.076 & 0.022 & 0.027 \\ -0.034 & -0.034 & 0.001 & 0.002 & -0.040 & -0.195 & -0.348 & -0.283 & -0.078 & -0.078 & -0.078 & -0.031 & -0.026 & -0.017 & 0.010 & 0.036 & 0.034 & 0.022 & 0.034 & 0.030 \\ -0.020 & -0.025 & -0.029 & -0.047 & -0.059 & -0.159 & -0.279 & -0.239 & -0.041 & -0.008 & -0.015 & 0.002 & 0.027 & 0.030 & 0.021 & 0.046 & 0.046 & 0.027 & 0.030 & 0.024 \end{bmatrix}$$

است که کاهش سختی در این درایه نسبت به سایر نقاط بیشتر

است. پس احتمالاً بیشترین آسیب در حوالی بازه متناظر با این

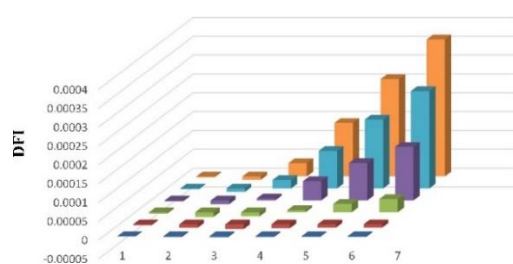
همچنین این ماتریس‌ها برای عرشه آسیب‌دیده در سناریو اول

به‌قرار زیر است:

همان‌طور که قبلاً گفته شد، بزرگ‌ترین درایه در ماتریس شاخص

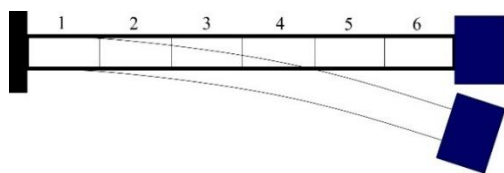
آسیب محل احتمالی آسیب را نشان می‌دهد. این به این معنی

پیداست شاخص آسیب در محل‌های ذکر شده تفاوت قابل توجهی با سایر درایه‌ها دارد که بیان‌گر محل آسیب است. بنابراین این روش توانایی تشخیص آسیب را در محل‌های مختلف دارد. با توجه به مثال‌های فوق، و درک خود ماتریس نرمی می‌توان گفت که در روی قطر اصلی باید به دنبال آسیب گشت. زیرا بزرگ‌ترین درایه‌ها روی قطر اصلی نمایان خواهند شد. اما بررسی شاخص آسیب برای سناریو سوم با سناریوهای قبلی متفاوت است. نمودار میله‌ای شاخص آسیب در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

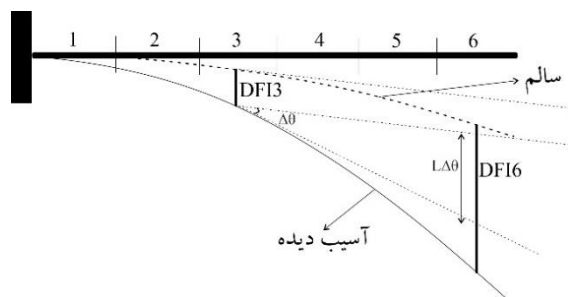


شکل (۱۱). نمودار ستونی شاخص آسیب ستون در سناریو سوم

برخلاف عرشه، بیشینه شاخص آسیب در محل آسیب (بازه سوم که متناظر با درایه A_{33}) نیست، بلکه در محل سرستون یعنی درایه A_{66} است. برای تفسیر این موضوع باید به شکل (۱۲-الف) مراجعه کرد. ستون را می‌توان با یک طره و جرم متمرکز در رأس آن معادل‌سازی کرد.



الف) معادل‌سازی ستون با طره



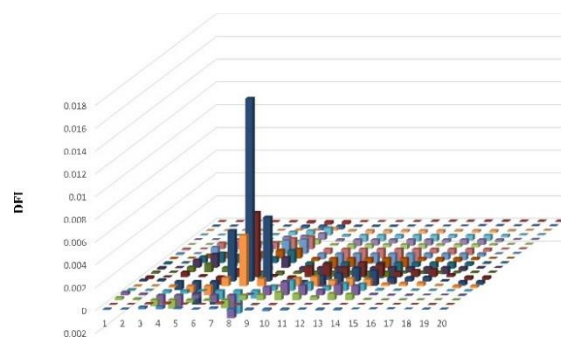
ب) معادل‌سازی جابجایی ستون با طره

شکل (۱۲). بررسی شاخص آسیب ستون با معادل‌سازی ستون با طره

در این معادل‌سازی ستون با طره و عرشه با یک جرم متمرکز جایگزین شده‌اند. مشاهده می‌شود که جابجایی نقاط با نزدیک

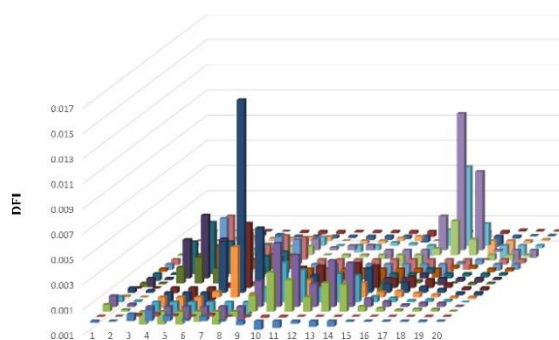
درایه اتفاق افتاده است.

از آنجاکه با بزرگ شدن سازه، ابعاد ماتریس نرمی و شاخص آسیب نیز بزرگ می‌شود، بررسی شاخص آسیب برای تشخیص محل آسیب با مشکل مواجه می‌شود. به‌طور مثال پیدا کردن محل آسیب با استفاده از ماتریس شاخص آسیب بسیار سخت است. برای درک بهتر شاخص آسیب می‌توان از نمودار میله‌ای بهره برد و با رسم نمودار میله‌ای درایه‌های ماتریس شاخص آسیب، می‌توان به محل آسیب و درک درستی از آن پی برد. شکل (۹) ماتریس شاخص آسیب را به کمک میله نشان می‌دهد.



شکل (۹). نمودار ستونی شاخص آسیب عرشه در سناریو اول

محل آسیب در عرشه که در بازه ۷ معرفی شده بود، به‌خوبی در شکل (۹) مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محل آسیب در درایه a_{77} دارای ستون بزرگ‌تری نسبت به بقیه است که اختلاف آن با بقیه مشهود است و محل آسیب را نشان می‌دهد. همچنین درایه‌های نزدیک به درایه a_{77} از مقادیر بزرگ‌تری نسبت به درایه‌های دورتر برخوردارند که به دلیل نزدیکی آن‌ها به محل اصلی آسیب است. به‌طور مشابه برای سناریو دوم شاخص آسیب قابل محاسبه است که ماتریس‌های تشکیل‌دهنده آن در اینجا ذکر نشده است. اما نمودار میله‌ای آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰). نمودار ستونی شاخص آسیب عرشه در سناریو دوم

شکل (۱۰) محل آسیب را در بازه‌های ۷ و ۱۶ (درایه‌های a_{77} و a_{16-16}) به‌خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۱۰)

اجزا محدود آبکوس استفاده شد. روش شبیه‌سازی در این پژوهش با استفاده از نتایج تحلیل فرکانسی پل آلفوسا، اعتبار سنجی شد.

سه سناریو مختلف آسیب برای بررسی پایش سلامت پل سگمنتال در نظر گرفته شدند. این سناریوها به ترتیب عبارت‌اند از:

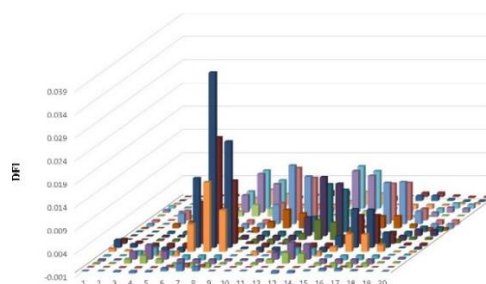
- ۱- کاهش سختی معادل یک محل از عرشه (به طول ۱۵ متر)،
- ۲- کاهش سختی چندگانه در عرشه (دو محل به صورت هم‌زمان)
- ۳- کاهش سختی ستون. برای هر کدام از این سناریوها کاهش سختی با اعمال کاهش ۳۰ درصد در مدول الاستیک بتن انجام شد. در نهایت نتیجه‌گیری‌های زیر با انجام این پژوهش حاصل شده است:

- ۱- پایش سلامت پل سگمنتال امام خمینی (ره) کرمانشاه به روش ماتریس نرمی، با دقت خوبی قادر به تشخیص آسیب معرفی شده در عرشه بود. اما برای تشخیص دقیق محل آسیب معرفی شده در ستون، به بررسی بیشتری نیاز داشت.
- ۲- تعداد محل‌های آسیب هیچ‌گونه محدودیتی برای پایش سلامت به روش ماتریس نرمی ندارد و قادر به پایش آسیب‌های چندگانه است. به‌طوری‌که دو آسیب معرفی شده در دونقطه مجزای پل سگمنتال (که به‌طور هم‌زمان در عرشه پل و دور از هم بودند) به‌خوبی شناسایی شدند.
- ۳- ماتریس نرمی سازه حساسیت کمتری به تعداد مودها دارد و با افزایش اندک تعداد مودها به‌سرعت همگرا می‌شود.
- ۴- نتایج پایش سلامت پل سگمنتال به روش ماتریس نرمی با استفاده از ۲ مود، با تقریب خوبی به نتایج پایش سلامت بر مبنای ۶ مود، نزدیک بود.
- ۵- با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان، محل و تعداد نقاط نصب تجهیزات پایش سلامت عرشه پل سگمنتال را از قبل مطابق با محل قرائت اشکال مودی تعیین کرد و از نصب سنسورهای اضافی که کاربردی ندارند، اجتناب کرد و باعث صرفه‌جویی در هزینه شد. بنابراین با توجه به تقسیم‌بندی عرشه پل به ۲۰ قسمت مساوی، تعداد سنسورهای موردنیاز برای پایش سلامت عرشه ۲۰ عدد هست که در مرکز عرشه و در وجه پایینی آن نصب شوند.

۵. مراجع

- [1] M.B. Ismail, and A.A. Gab-Allah, "Value Engineering in Egyptian bridge construction," Journal of Construction Engineering and Management, vol 117 (3), pp. 393-401, 1991.
- [2] S.L. Davis, D. Goldberg, K. DeGood, N. Donohue, and J. Corless, "The Fix We're In For: The State of Our Nation's Bridges," Retrieved from Transportation for America, 1707 L Street NW, Suite 250, Washington, DC, (2013).

شدن به سر طره بیشتر می‌شود. این اتفاق نیز در نمودار میله‌ای شاخص آسیب نمایان است و همان ششم که متناظر با سرستون است بیشترین اختلاف را دارد (در حالتی که آسیب در بازه سوم تعریف شده است). تغییر شکل‌های طره را می‌توان به‌صورت شکل (۱۲-ب) نشان داد. باوجود آسیب و کاهش سختی، مقدار دوران در محل آسیب نیز افزایش می‌یابد که با $\Delta\theta$ نشان داده شده است. همین اختلاف دوران خود باعث جابجایی مضاعف در نقطه ۶ می‌شود که برابر با $L\Delta\theta$ است. در نهایت این عوامل باعث می‌شود که DFI_{66} نسبت به DFI_{33} مقدار بزرگ‌تری داشته باشد. با توجه به توضیحات فوق می‌توان گفت که پایش سلامت ستون به روش ماتریس نرمی به‌سادگی عرشه نیست. این روش با اینکه آسیب در ستون را نشان می‌دهد، اما تشخیص محل آن به بررسی‌های بیشتری نیاز دارد. یکی از خواص پایش سلامت به روش ماتریس نرمی، دقت خوب نتایج با تعداد مودهای اندک است. در سناریوهای قبل از ۶ مود استفاده شد و پایش سلامت به‌خوبی صورت گرفت. در این بخش آسیب مربوط به سناریو دوم با استفاده از دو مود (مودهای ۴ و ۵)، مجدداً پایش خواهد شد. مشابه روند سناریوهای قبلی، نمودار میله‌ای شاخص آسیب عرشه مطابق شکل (۱۳) خواهد بود.



شکل (۱۳). شاخص آسیب عرشه در سناریو اول با استفاده از دو مود

همان‌طور که مشاهده می‌شود، باوجود دو مود، شاخص آسیب در نقاط دیگر بیشتر شده است. اما همچنان اختلاف شاخص آسیب در بازه هفتم نسبت به درایه‌های دیگر مشهود است و به‌راحتی می‌توان گفت که بازه هفتم محل آسیب است. البته دقت آن نسبت به حالت استفاده از ۶ مود کمتر است. پس می‌توان از تعداد مودهای حداقل برای پایش سلامت پل‌های بزرگ نیز استفاده کرد که مزیت خوبی برای استفاده از این روش است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش پایش سلامت پل به روش ماتریس نرمی بررسی شد و پل سگمنتال تقاطع غیر هم‌سطح امام خمینی (ره) به‌عنوان مطالعه موردی به کار گرفته شد. برای شبیه‌سازی پل از نرم‌افزار

- [14] A. Pandey, and M. Biswas, "Damage detection in structures using changes inflexibility," *Journal of sound and vibration*, vol 169, pp. 3–17, (1994).
- [15] A.E. Aktan, K.L. Lee, C. Chuntavan, and T. Aksel, "Modal Testing for Structural Identification and Condition Assessment of Constructed Facilities," in *Proc. Of 12th International Modal Analysis Conference*, 462–468, (1994).
- [16] T. Toksoy, and A.E. Aktan, "Bridge-condition Assessment by Modal Flexibility," *Journal of Experimental mechanics*, pp. 271-278, (1994).
- [17] A. Patjawit, and W. Kanok-Nukulchai, "Health monitoring of highway bridges based on a Global Flexibility Index," *Journal of Engineering Structures*, vol 27 (9), pp. 1385-1391, (2005).
- [18] A.M. Yan, J.C. Golinval, "Structural damage localization by combining flexibility and stiffness methods," *Journal of Engineering Structures*, vol 27(12), pp. 1752–1761, (2005).
- [19] E. Reynders and G. De Roeck, "A local flexibility method for vibration-based damage localization and quantification," *Journal of Sound and Vibration*, vol 329(12), pp. 2367–2383, (2010).
- [20] R. Soman, M. Kyriakides, T. Onoufriou, and W. Ostachowicz, "Numerical evaluation of multi-metric data fusion based structural health monitoring of long span bridge structures," *Journal of Structure and Infrastructure Engineering*, vol 14 (6), (2017).
- [21] W. R. Wickramasinghe, D. P.Thambiratnam, and T. H.T. Chan, "Damage Detection in a Suspension Bridge Using Modal Flexibility Method," *Journal of Engineering Failure Analysis*, (Pre proof), (2020),
- [22] S. Schommer, J. Mahowald, V.H. Nguyen, D. Waldmann, and S. Maas, "Health Monitoring Based on Dynamic Flexibility Matrix: Theoretical Models versus In-Situ Tests," *Journal of ENG*, 9 (2), (2017).
- [23] H. LIU, and Z. Li, "An improved generalized flexibility matrix approach for structural damage detection," *Journal of Inverse Problems in Science and Engineering*, vol 28 (6), (2020).
- [24] M. R. Kaffash, S. Behraves, and S. M. Adham Hashemi, "Assessment of Fire Resistance for Industrial Steel Structures," *Journal of Science and Technology Construction*, vol 2 (1), 2021 (In Persian).
- [25] G.P. Pålsson, "Finite Element Modelling and Updating of Medium Span Road Bridges," M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2012.
- [3] A.D. Orcési, and D.M. Frangopol, "Optimization of assessment strategies for aging bridges," *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, CRC Press, 581-586, (2011).
- [4] M. Modares, and N. Waksanski, "Overview of Structural Health Monitoring for Steel Bridges," *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol 18 (3), pp. 187-191, (2013).
- [5] D. Balageas, C. P. Fritzen, and A. Güemes, "Introduction to Structural Health Monitoring," *John Wiley & Sons*, vol 90, (2010).
- [6] F. Magalhães, A. Cunha, and E. Caetano, "Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol 28, pp. 212-228, (2012).
- [7] M. H. Richardson, "Detection of Damage in Structures from Changes in their Dynamic (Modal) Properties," A Survey, NUREG/CR- 1431, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C, (1980).
- [8] M. Biswas, A.K. Pandey, and M.M. Samman, "Diagnostic Experimental Spectral/Modal Analysis of a Highway Bridge," *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, vol 5, pp. 33–42, (1990).
- [9] C. Spyrakos, H. Chen, J. Stephens, V. Govindaraj, K. Chong, S. Liu, and J. Li, "Evaluating structural deterioration using dynamic response characterization," *Elsevier, London*, vol 137, (1990).
- [10] M. Raghavendrachar, and A.E. Aktan, "Flexibility by Multireference ImpactTesting for Bridge Diagnostics," *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol 118, pp. 2186–2203, (1992).
- [11] O. Huth, G. Feltrin, J. Maeck, N. Kilic, and M. Motavalli, "Damage identification using modal data: Experiences on a prestressed concrete bridge," *Journal of Structural Engineering*, vol 131(12), pp. 1898-1910, (2005).
- [12] C.R. Farrar, and D.A. Jauregui, "Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I. Experiment," *Smart Materials and Structures*, 7(5), 704, (1998).
- [13] J.W. Brownjohn, A. De Stefano, Y.L. Xu, H. Wenzel, and A.E. Aktan, "Vibration-based monitoring of civil infrastructure: challenges and successes," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol 1(3), pp. 79-95, (2011).