

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

تخمین فرکانس‌های ویژه‌ی پل بر اساس پاسخ خودرو با استفاده از جداسازی
سیگنال‌های ناپیدا (BSS)

نگارنده: مریم قاسمی ادکان

استاد راهنما

جناب آقای دکتر علی کیهانی

استاد مشاور

جناب آقای مهندس امید خادم حسینی

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۲۷
تاریخ: ۵/۳/۸۱

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورت جلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مریم قاسمی اداکان با شماره دانشجویی ۹۳۱۳۳۴۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه، تحت عنوان تخمین فرکانس های ویژه ی پل بر اساس پاسخ خودرو با استفاده از چرخه سازه زلزله ای (BSS) که در تاریخ ۹۶/۰۶/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

| <input type="checkbox"/> قبول (با امتیاز درجه) | | | |
|---|------------------------|------------|-------|
| <input type="checkbox"/> مردود | | | |
| نوع تحقیق: <input checked="" type="checkbox"/> نظری <input type="checkbox"/> عملی | | | |
| عضو هیأت داوران | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
| ۱- استاد راهنمای اول | دکتر علی کیهانی | دانشیار | |
| ۲- استاد راهنمای دوم | | | |
| ۳- استاد مشاور | مهندس امید خادم حسینی | | |
| ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی | دکتر محمد شامخی امیری | استادیار | |
| ۵- استاد ممتحن اول | دکتر سید مهدی توکلی | استادیار | |
| ۶- استاد ممتحن دوم | دکتر وحیدرضا کلات جاری | دانشیار | |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تیسره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از فواسته هایشان گذشتند، سفتی ها را به جان فریدند
و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در
آن ایستاده ام برسم .

و برادرم

که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم بود و تکیه گاه من در مواجهه با
مشکلات، و وجودش مایه دلگرمی من می باشد.

و خواهرانم

که وجودشان شادی بخش و صفایشان همواره مایه آرامش من است.

تشکر و قدردانی

از استاد مهربانم، **جناب آقای دکتر علی کیهانی** که با حسن خلق و فروتنی، زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند. و از استاد صبورم، **جناب آقای دکتر امید فادم حسینی** که زحمت مشاوره این پایان نامه را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمیرسید، کمال تشکر و قدردانی را دارم. باشد که این فردترین بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب **مریم قاسمی ادکان** دانشجوی دوره **کارشناسی ارشد رشته عمران-سازه** دانشکده **عمران و معماری** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تخمین فرکانس‌های ویژه‌ی پل بر اساس پاسخ خودرو با استفاده از جداسازی سیگنال‌های ناپیدا (BSS)** تحت راهنمایی **جناب آقای دکتر علی کیهانی** به عنوان استاد راهنمای خود متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۱۳۹۶ / ۰۶ / ۲۱

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

برای شناسایی وضعیت سازه‌ای در پل‌ها، نیاز است تا خصوصیات دینامیکی آن‌ها از جمله اشکال مودی تعیین شوند و مورد بررسی قرار گیرند. در حال حاضر روش‌های پایش سلامت سازه‌ای (SHM) با استفاده از پاسخ دینامیکی سازه جزء روش‌های محبوب در زمینه‌ی تعمیر و نگهداری سازه‌ها محسوب می‌شوند. پایش سلامت سازه‌ی پل با دو رویکرد، پایش مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌گیرد. در پایش مستقیم، چندین حس‌گر در نقاط مختلف پل نصب می‌شوند و خودرویی با مشخصات معلوم به عنوان محرک از روی پل عبور می‌کند. اما در پایش غیر مستقیم، حس‌گر روی خودرو نصب می‌شود. در این حالت، خودرو علاوه بر محرک بودن به عنوان گیرنده نیز عمل می‌کند. در هر دو روش، پاسخ دینامیکی حاصل از اندرکنش پل-خودرو که به صورت تیر مستقیم و خمیده تحت بار متحرک مدل‌سازی شده‌اند، به عنوان سیگنال ورودی به الگوریتم‌های جداسازی سیگنال‌های ناپیدا (BSS) داده می‌شود. تحلیل مؤلفه‌های مستقل (ICA) و شناسایی کور منابع (SOBI) دو الگوریتم اساسی تکنیک BSS هستند. یکی از خروجی‌های این الگوریتم‌ها، مودشکل‌های سازه‌ی پل هستند. جهت صحت‌سنجی نتایج از مقایسه آن با نتایج حاصل از روش تحلیلی اجزای محدود استفاده گردیده است. در پایان، با استفاده از مودشکل‌های بدست آمده، شناسایی محل آسیب در پل‌های مستقیم و خمیده انجام گرفته است. نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی توانایی، صحت و دقت مناسب روش جداسازی سیگنال‌های ناپیدا در زمینه‌ی دینامیک سازه است.

کلمات کلیدی: پایش سلامت سازه‌ی پل، اندرکنش پل-خودرو، تکنیک جداسازی

سیگنال‌های ناپیدا، اشکال مودی سازه، انحنای شکل مودی.

لیست مقاله‌های استخراج شده از پایان‌نامه :

قاسمی ادکان م.، کیهانی ع.، خادم حسینی ا.؛ "تخمین اشکال مودی پل بر اساس پاسخ دینامیکی ناشی از عبور خودرو با استفاده از روش جداسازی کور منابع"، چهارمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری و سومین کنفرانس و نمایشگاه تخصصی انبوه‌سازان مسکن و ساختمان استان تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۷ و ۸ بهمن ماه ۹۵، تهران، ایران.

قاسمی ادکان م.، کیهانی ع.، خادم حسینی ا.؛ "شناسایی محل خرابی در پل‌ها بر اساس تغییرات انحنای شکل‌های مودی حاصل از روش جستجوی کور منابع"، سومین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک عمران و فناوریهای پیشرفته، مجتمع آموزش عالی_فنی و مهندسی اسفراین، ۱۹ و ۲۰ مهر ماه ۹۶، خراسان شمالی، اسفراین، ایران.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و محتوای پایان نامه

- ۱-۱- پیش‌گفتار ۲
- ۲-۱- اهمیت و ضرورت انجام پژوهش ۳
- ۳-۱- صورت مسأله ۵
- ۴-۱- اهداف تحقیق ۶
- ۵-۱- ساختار پایان‌نامه ۶

فصل دوم: ادبیات فنی پژوهش

- ۱-۲- پیش‌گفتار ۱۰
- ۲-۲- تاریخچه‌ی پایش سلامت پل ۱۱
- ۳-۲- مطالعات انجام شده روی اندرکنش پل_خودروی عبوری ۱۲
- ۴-۲- تاریخچه‌ی روش جداسازی سیگنال‌های ناپیدا ۱۴
- ۵-۲- عیب‌یابی پل ۱۵

فصل سوم: پایش سلامت سازه‌ی پل

- ۱-۳- پیش‌گفتار ۲۰
- ۲-۳- پایش مستقیم ۲۰
- ۱-۲-۳- اندرکنش پل مستقیم و خودروی عبوری ۲۱
- ۱-۱-۲-۳- تحلیل دینامیکی تیر مستقیم تحت اثر نیروی متمرکز متحرک ۲۱
- ۲-۱-۲-۳- تحلیل دینامیکی تیر مستقیم تحت اثر یک جرم متحرک ۲۴

| | |
|----|---|
| ۲۶ | ۳-۲-۱-۳- تحلیل دینامیکی تیرمستقیم تحت اثر سیستم جرم-فنر متحرک |
| ۳۱ | ۳-۲-۲- اندرکنش پل خمیده و خودروی عبوری |
| ۳۸ | ۳-۳- پایش غیرمستقیم |
| ۳۹ | ۳-۳-۱- حالت تک محوره |
| ۳۹ | ۳-۳-۲- حالت دو محوره |
| ۴۲ | ۳-۴- شناسایی محل آسیب |

فصل چهارم: روش جداسازی سیگنال‌های ناپیدا (BSS)

| | |
|----|--|
| ۴۶ | ۴-۱- تکنیک جداسازی سیگنال‌های ناپیدا (BSS) |
| ۴۹ | ۴-۱-۱- تحلیل مؤلفه‌های مستقل (ICA) |
| ۴۹ | ۴-۱-۱-۱- کورتوزیز |
| ۵۰ | ۴-۱-۱-۲- نگانترپی |
| ۵۱ | ۴-۱-۲- شناسایی کور با استفاده از آمار مرتبه‌ی دوم (SOBI) |
| ۵۳ | ۴-۱-۲-۱- سفیدسازی |
| ۵۴ | ۴-۱-۲-۲- برآورد ماتریس ترکیب |

فصل پنجم: مثال‌های عددی

| | |
|----|----------------|
| ۵۸ | ۵-۱- پیش‌گفتار |
| ۵۸ | ۵-۲- مثال ۱ |
| ۶۲ | ۵-۳- مثال ۲ |
| ۶۶ | ۵-۴- مثال ۳ |
| ۶۸ | ۵-۵- مثال ۴ |

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷۱

۶-۱- نتیجه‌گیری

۷۳

۶-۲- پیشنهادات

۷۴

مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۳: تیر مستقیم تحت اثر نیروی متمرکز متحرک ۲۲
- شکل ۲-۳: تیر مستقیم با تکیه‌گاه ساده تحت جرم متحرک ۲۴
- شکل ۳-۳: تیر مستقیم مدل‌سازی شده در معرض حرکت سیستم جرم-فنر ۲۷
- شکل ۴-۳: درجات آزادی هر المان تیر ۳۰
- شکل ۵-۳: درجات آزادی تیر خمیده ۳۲
- شکل ۶-۳: تیر مستقیم مدل‌سازی شده در معرض حرکت سیستم دو محوره ۳۹
- شکل ۱-۵: تیر مدل‌سازی شده در معرض حرکت سیستم جرم-فنر ۵۹
- شکل ۲-۵: درجات آزادی تیر مفصلی مدل‌سازی شده ۵۹
- شکل ۳-۵: مود شکل‌های بدست آمده از الگوریتم‌های BSS ۶۰
- شکل ۴-۵: مود شکل‌های بدست آمده از روش FEM ۶۱
- شکل ۵-۵: مقایسه اشکال مودی دو روش، SOBI و اجزای محدود با استفاده از شاخص MAC ۶۲
- شکل ۶-۵: مقایسه اشکال مودی دو روش، ICA و اجزای محدود با استفاده از شاخص MAC ۶۲
- شکل ۷-۵: تیر خمیده در معرض حرکت نیروی متمرکز متحرک ۶۳
- شکل ۸-۵: درجات آزادی تیر خمیده مفصلی مدل‌سازی شده ۶۳
- شکل ۹-۵: مود شکل‌های بدست آمده از الگوریتم‌های BSS (تیر خمیده) ۶۴
- شکل ۱۰-۵: مود شکل‌های بدست آمده از FEM (تیر خمیده) ۶۵
- شکل ۱۱-۵: مقایسه اشکال مودی دو روش، SOBI و اجزای محدود با استفاده از شاخص MAC ۶۵
- برای تیر خمیده

شکل ۵-۱۲: مقایسه اشکال مودی دو روش، ICA و اجزای محدود با استفاده از شاخص MAC

۶۵ برای تیر خمیده

شکل ۵-۱۳: مود شکل‌های بدست آمده از الگوریتم SOBI

۶۷ شکل ۵-۱۴: انحنای شکل مودی سازه

۶۸ شکل ۵-۱۵: تغییرات انحنای شکل مودی

شکل ۵-۱۶: مود شکل‌های به دست آمده از الگوریتم SOBI

۷۰ شکل ۵-۱۷: انحنای شکل مودی سازه

۷۰ شکل ۵-۱۸: تغییرات انحنای شکل مودی

فهرست جدول‌ها

- جدول ۵-۱: پارامترهای تیر و مجموعه‌ی جرم_فنر مدل‌سازی شده ۵۰
- جدول ۵-۲: مشخصات تیر خمیده تحت اثر نیروی متمرکز متحرک ۶۳

فصل اول:

مقدمه و محتوای پایان نامه

۱-۱- پیش‌گفتار

امروزه با ساخت سازه‌هایی با انعطاف‌پذیری بالا، برآورد مشخصات دینامیکی جهت پایش سلامت و در صورت نیاز اعمال روش‌های کنترل ارتعاش بر روی این‌گونه سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این میان شاید پل‌ها را بتوان به عنوان المان‌های کلیدی در نظر گرفت که نیازمند چنین پایش‌هایی می‌باشند. در حال حاضر سیستم‌های مدیریت پل^۱ (BMSs) به همراه بازرسی‌های پل در کشورهای مختلف، توسعه یافته است [۱]. به طور مثال در کشورهای همچون ژاپن، که در معرض آسیب‌های طبیعی هستند، توصیه شده است که پایش زیرساخت‌های مهندسی همانند پل‌ها به صورت پیوسته صورت پذیرد [۲]. از آنجایی که افزایش بازرسی پل به منظور وجود آسیب‌های سازه‌ای، هزینه‌های قابل توجه و پیامدهای عملی را برای مدیران و صاحبان پل‌ها در پی خواهد داشت، پژوهشگران همواره در پی جایگزینی روشی مناسب و کارآمد بوده‌اند. اکنون روش‌های پایش سلامت سازه‌ای^۲ (SHM)، با استفاده از پاسخ دینامیکی سازه در حال تبدیل شدن به بخش بسیار محبوب سیستم‌های مدیریت، تعمیر و نگهداری زیرساخت‌ها می‌باشند. از آنجایی که SHM به تشخیص خودکار رفتارهای سازه‌ای غیرعادی متکی می‌باشد؛ می‌توان از ایمنی و دوام سازه در طول مدت خدمت آن اطمینان حاصل نمود [۳]. یکی از معروف‌ترین رویکردهای SHM، استفاده از داده‌های ارتعاشی برای برآورد غیرمخرب آسیب است.

روش‌های شناسایی سیستم سازه‌ای را می‌توان، با توجه به اطلاعات اولیه مورد نیازشان، به دو دسته تقسیم کرد. دسته‌ی اول، روش‌هایی هستند که به روش‌های ورودی-خروجی معروف هستند و در آن‌ها باید بازتاب‌های اندازه‌گیری شده (خروجی‌ها) و همچنین تحریک‌های اعمال شده (ورودی‌ها) مشخص باشند. دسته‌ی دوم، روش‌هایی هستند که در آن‌ها برای شناسایی سیستم، نیازی به اطلاع دقیق از تحریک‌های ورودی نمی‌باشد؛ این روش‌ها به روش‌های خروجی محور معروف هستند. با توجه

¹ Bridge management systems

² Structural health monitoring

به اطلاعات اولیه‌ی مورد نیاز در روش‌های ورودی- خروجی، استفاده از این روش‌ها مستلزم انجام تست‌های آزمایشگاهی است که در آن‌ها تحریک وارده قابل اندازه‌گیری و کنترل باشد. از طرفی به دلیل هزینه‌ی نسبتاً بالای این‌گونه آزمایش‌ها و همچنین ملاحظات ایمنی سازه، در دو دهه‌ی اخیر توجه محققین به روش‌های خروجی محور جلب شده است.

پژوهش حاضر، برای برآورد مشخصات دینامیکی سازه‌ی پل به ویژه فرکانس‌های اصلی آن، از روش جداسازی سیگنال‌های ناپیدا^۱ (BSS) استفاده می‌کند. از نقطه نظر قدمت، شاید بتوان فرکانس طبیعی سیستم را معروف‌ترین شاخص برای آسیب پل دانست. یک ویژگی جالب روش BSS این است که نیازی به اطلاعات دقیق در مورد تحریک‌های اعمال شده (ورودی‌ها) ندارد و تنها با استفاده از بازتاب‌های اندازه‌گیری شده عمل می‌کند؛ به عبارت دیگر، روشی خروجی-محور است. این ویژگی، برای آنالیز مودال پل‌ها بسیار کارآمد است؛ زیرا در عمل، اندازه‌گیری دقیق همه‌ی محرک‌ها (ارتعاشات ناشی از باد، ترافیک، زلزله و غیره) امکان‌پذیر نمی‌باشد [۴].

جداسازی سیگنال‌های ناپیدا (BSS) عبارت است از بازیابی سیگنال‌های مشاهده نشده یا همان «منابع»، از روی ترکیباتی از آن‌ها که مشاهده شده‌اند. معمولاً مشاهدات از طریق خروجی مجموعه‌ای از حس‌گرها، که هر یک ترکیبات مختلفی از سیگنال‌های منبع را دریافت کرده‌اند، بدست می‌آیند.

۲-۱- اهمیت و ضرورت انجام پژوهش

نظارت بر سلامت سازه‌های عمرانی و تشخیص آسیب‌های آن در مراحل اولیه، یکی از موضوعات مورد توجه همیشگی بوده است. اهمیت پل‌ها به‌عنوان گره‌های ارتباطی در شریان‌های حمل‌ونقل بر کسی پوشیده نیست. از این‌رو بررسی خرابی در این سازه‌ها به منظور ایجاد یک چرخه‌ی تعمیر و نگهداری نیاز به توجه محققین دارد. بر اساس آمار موجود، حدود ۶۶/۴۰۵ پل آسیب دیده‌ی سازه‌ای در ایالات متحده (حدوداً بیش از ۱۱ درصد پل‌های موجود) وجود دارند که از این تعداد،

^۱ Blind Source Separation (BSS)

درصد قابل توجهی عمری بالاتر از ۶۵ سال دارند [۵]. در اروپا اغلب پل‌ها پس از جنگ جهانی دوم و در فاصله‌ی بین سال‌های ۱۹۴۵ تا ۱۹۶۵ ساخته شده‌اند [۶]. در دهه‌های اخیر به دلیل افزایش حجم باری و ابعاد وسایل نقلیه، شرایط بارگذاری این پل‌ها دست‌خوش تغییراتی شده است. بعلاوه، اغلب این پل‌ها در معرض خوردگی با زمان هستند و در حال حاضر تعداد قابل توجهی دچار نقص‌های سازه‌ای می‌باشند. بازسازی و افزایش طول عمر این سازه‌ها، اهمیت موضوعات نگهداری و ایمنی را بالا می‌برد.

لزوم شناسایی محل و مقدار خرابی در سازه‌ها بسیار حائز اهمیت است. با استفاده از روش‌های عیب‌یابی سازه می‌توان مکان‌های خرابی در سازه‌ی آسیب دیده را شناسایی نمود و بدین ترتیب با انجام اقدامات لازم، از گسترش آسیب در اعضای مختلف سازه جلوگیری کرد و عمر آن را افزایش داد. در این راستا روش‌های غیر مخرب به دلیل کم هزینه و اقتصادی بودن، دارای اهمیت ویژه‌ای هستند که ضرورت این تحقیق را بیش از پیش آشکار می‌نماید. علاوه بر این، می‌توان با پیش‌بینی مکان‌های ضعف سازه، عملیات بهینه‌ای جهت ترمیم و بهسازی آن در برابر زلزله انجام داد. بدین صورت که با شناسایی محل‌های ضعف سازه و ترمیم فقط همان قسمت آسیب‌دیده، می‌توان از صرف هزینه‌های زیاد و بعضاً غیر عملی جهت ترمیم کل سازه جلوگیری نمود.

پژوهش حاضر، به استفاده از تکنیک جداسازی کور سیگنال‌ها تأکید دارد، به این دلیل که در دو دهه‌ی اخیر مطالعات گسترده‌ای روی این مقوله شکل گرفته و زمینه‌ی کاربرد آن را در زیرشاخه‌های مختلف علم فراهم کرده است؛ اما هم‌چنان کاربرد آن در زمینه‌ی دینامیک سازه به صورت یک چالش باقی مانده است.

علاوه بر موارد ذکر شده در مورد ضرورت انجام این پایان‌نامه، می‌توان به این مورد نیز اشاره کرد که با توجه به این که مطالعات زیادی بر روی پل‌های مستقیم انجام شده است، اما هنوز اطلاعات کافی در مورد پل‌های خمیده در دسترس نیست و نیاز است در این مورد هم تحقیقاتی در آینده انجام گردد؛ از این‌رو پژوهش حاضر علاوه بر پل‌های مستقیم به بررسی پل‌های خمیده نیز به صورت

جداگانه پرداخته است.

۱-۳- صورت مسأله

در این پایان نامه، پایش سلامت سازه‌ی پل با استفاده از روش‌های پایش مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. برای دستیابی به هدف مورد نظر، نیاز است تا خصوصیات دینامیکی پل از جمله فرکانس‌های اصلی و اشکال مودی تعیین شوند و مورد بررسی قرار گیرند.

در پایش مستقیم، خودرویی با مشخصات معلوم به عنوان محرک، از روی پل عبور می‌کند. هم‌زمان با عبور خودرو، حس‌گرهایی که در نقاط مختلف پل نصب شده‌اند، پاسخ دینامیکی شامل: جابه‌جایی، سرعت و شتاب مربوط به نقاط مورد نظر را ثبت می‌کنند. در پایان‌نامه‌ی حاضر برای بیان اندرکنش بین پل و خودروی عبوری، از مدل‌سازی آن‌ها به روش اجزای محدود استفاده شده است. به این ترتیب که، پل به صورت یک تیر الاستیک با دو انتهای مفصلی و خودرو به صورت سیستم جرم-فنر مدل‌سازی شده است. سپس برنامه‌ی تحلیل تیر و اندرکنش آن با سیستم جرم-فنر در محیط نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شده است. با استفاده از پاسخ دینامیکی بدست آمده از تحلیل تیر و اعمال روش جستجوی کور منابع، فرکانس‌های اصلی و شکل مودهای مرتبط با آن‌ها بدست آمده است. هم‌چنین بعد از تعیین اشکال مودی، با به‌کارگیری روش انحنای کرنش شکل مودی، شناسایی محل آسیب در پل‌های مستقیم و خمیده انجام گردیده است.

در پایش غیرمستقیم، خودروی عبوری مجهز به حس‌گر است و هم‌زمان هم به عنوان محرک و هم گیرنده، عمل می‌کند. در این روش نیز، با استفاده از پاسخ ثبت شده توسط حس‌گری که به خودرو نصب شده است و اعمال روش جستجوی کور منابع، خصوصیات دینامیکی پل به دست می‌آیند. برای دستیابی به هدف مورد نظر، مانند روش قبل از مدل‌سازی پل و خودروی عبوری استفاده گردیده است. تفاوت این روش با رویکرد قبل، این است که، از پاسخ دینامیکی خودرو برای تعیین فرکانس‌ها و اشکال مودی پل استفاده شده است.

صحت‌سنجی روش جستجوی کور منابع در زمینه‌ی دینامیک سازه، از طریق مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن با نتایج بدست آمده از روش اجزای محدود انجام شده است.

۴-۱- اهداف تحقیق

در پایان‌نامه حاضر، تلاش شده است با بررسی روش جستجوی کور منابع برای سازه‌ی پل و مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از آن با نتایج حاصل از روش اجزای محدود به منظور صحت‌سنجی، گوشه‌ای از کمبود مطالعات روش‌های تحلیلی در مهندسی عمران جبران گردد. به عبارت دیگر، این تحقیق انجام شده است تا کاربرد الگوریتم‌های BSS در زمینه‌ی دینامیک سازه شناخته شوند و در صورت صحت نتایج بدست آمده، برای پایش سلامت سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

۵-۱- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در شش فصل به شرح ذیل تدوین شده است:

فصل اول به بیان صورت مسأله، اهمیت و ضرورت انجام پژوهش و اهداف آن می‌پردازد.

در فصل دوم، ادبیات فنی پژوهش ارائه شده است و به صورت مروری اجمالی بر کارهایی است که در گذشته در این زمینه انجام گردیده است.

فصل سوم به مدل‌سازی پل و خودروی عبوری اختصاص یافته و هر دو روش، پایش مستقیم و غیر مستقیم بیان گردیده است. در انتهای فصل نیز، نحوه‌ی شناسایی محل خرابی توضیح داده شده است.

در فصل چهارم به معرفی و تشریح کامل تکنیک BSS و الگوریتم‌های اساسی آن شامل الگوریتم ICA و SOBI پرداخته شده است.

در فصل پنجم برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی BSS، چند مثال عددی ارائه شده است. تمام مثال‌ها با روش تحلیلی اجزای محدود نیز حل شده و مقایسه صورت گرفته است.

در نهایت در فصل ششم، نتایج حاصل از این پژوهش و پیشنهادات جهت ادامه‌ی تحقیقات بیان

شده است.

فصل دوم:

ادبیات فنی پژوهش

۲-۱- پیش‌گفتار

سازه‌ها در برابر حوادث طبیعی مانند زلزله به علت خرابی‌های سازه‌ای آسیب پذیر هستند. خرابی‌های ساختمانی باعث ضعیف شدن سازه‌ها می‌شود که این امر موافق عملکرد بعدی سیستم نمی‌باشد. در بیشتر مواقع نظارت رفتار سازه‌ای و کنترل یکپارچگی آن جهت ایمنی سازه‌ها بسیار مشکل است. بسیاری از تاسیسات مهندسی سازه مانند بزرگراه‌ها، پل‌های راه آهن، خطوط لوله (از قبیل خطوط لوله آب، گاز و نفت خام)، برج‌های انتقال انرژی و سازه‌های دریایی در مدت طولانی عمر خود مقاومتشان از بین رفته و دلیل عدم مطابقت با استانداردهای مدرن، استفاده نامطلوب، عدم تعمیرات و نگهداری نامناسب و در برخی موارد به علت طراحی نامناسب، این سازه‌ها زوال رفته و فرسوده می‌شوند و این پارامترها می‌تواند باعث خرابی غیر قابل بازگشتی شود. برای مثال در ۲۷ آگوست سال ۲۰۰۰ دو مقطع یک پل در تایوان شکسته شد و به پایین رودخانه افتاد و به علت این حادثه ۲۲ نفر آسیب دیدند و یا در ۴ مارچ ۲۰۰۵ یک پل در شمال پرتغال به داخل رودخانه فروریخت و ۱۲ نفر کشته شدند [۷]. گزارش سال ۲۰۰۱ برای زیرساخت‌های کشور آمریکا به این اشاره دارد که نزدیک به یک سوم تا یک دوم ساختمان‌های ملی (جاده‌ها، پل‌ها، ساختمان‌های مدرسه و غیره) دچار نقص سازه‌ای می‌باشند و به تعمیر نیاز دارند [۸]. به منظور جلوگیری از، از دست رفتن زندگی و به وجود آمدن تاثیرات منفی به علت خرابی بیهوده سازه‌ها، شناسایی خرابی سازه‌ای و کوشا بودن در تعمیر آنها ضروری است. حفاظت از سیستم سازه‌ای و بازبینی شرایط سلامت سازه‌ای در یک فاصله زمانی می‌تواند نتایج سودمندی از قبیل افزایش بهره‌وری، کاهش در هزینه‌های نگهداری و افزایش طول عمر مفید سازه را داشته باشند. بنابراین امروزه شناسایی خرابی سازه‌ای^۱ (SDD) و پایش سلامت سازه‌ای^۲ (SHM) یکی از مسائل مهم جهانی در جامعه مهندسیین عمران، مکانیک و هوافضا شده است.

¹ Structural Damage Detection

² Structural Health Monitoring

۲-۲- تاریخچه‌ی پایش سلامت پل

در سال ۱۹۷۰، صنعت نفت به منظور تشخیص آسیب در سکوه‌های دریایی خود، از روش‌های شناسایی آسیب مبنی بر ارتعاش استفاده کرد؛ در اواخر همین سال با گسترش شاتل فضایی، صنعت هوا-فضا نیز روش‌های تشخیص آسیب براساس ارتعاش را مورد بررسی قرار داد. اوایل سال ۱۹۸۰، انجمن عمران مطالعاتی را در زمینه‌ی تشخیص آسیب سازه‌های پل و ساختمان انجام داد. همچنین از سال ۱۹۹۰ برخی از دولت‌های آسیایی قوانینی را مبنی بر این که شرکت‌های مجری موظف هستند در مدت زمان معینی، گواهی سلامت پل را در طول خدمت‌رسانی ارائه نمایند، مطرح کردند. همین امر تا حدودی موجب ارتقای پژوهش در زمینه‌ی سیستم‌های SHM برای پل‌ها با دهانه‌های بزرگ شده است [۹].

طبق پژوهش کو و نی در سال ۲۰۰۵، عملکرد سیستم‌های SHM پل را می‌توان به ۵ مرحله تقسیم کرد [۱۰]:

۱. استخراج داده‌ها با استفاده از حس‌گرهای مختلف؛

۲. پردازش داده‌ها شامل: نرمال‌سازی، پاک‌سازی، ذخیره کردن و انتقال داده‌ها؛

۳. تعیین مشخصات مودال سیستم؛

۴. شناسایی (تخمین) آسیب سازه بر اساس مشخصات مودال سازه؛

۵. تصمیم‌گیری برای ارزیابی موثر سازه‌ی پل.

سیستم SHM یک مسئله‌ی خروجی-محور است و این می‌تواند یک نقطه ضعف محسوب شود، بنابراین محققان برای رفع این مشکل، دو رویکرد اصلی را مورد توجه قرار داده‌اند: رویکرد اول، پیشرفت در زمینه‌ی فن‌آوری حس‌گرها است (سخت‌افزار، مربوط به مرحله‌ی ۱ و ۲) و دیگری،

توسعه‌ی الگوریتم تخمین آسیب و استخراج مشخصات دقیق‌تر با استفاده از خروجی‌های اندازه‌گیری شده است (تجزیه‌ی سیگنال، مربوط به مرحله‌ی ۳ و ۴). تحقیق و پژوهش بر روی قسمت سخت‌افزاری موجب ارتقای فن‌آوری حس‌گرها شده است، مانند حس‌گرهای فیبر نوری [۱۱]، شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم [۱۲، ۱۳] و ساختار هوشمند و غیره. همچنین تحقیق بر روی استخراج مشخصه (مربوط به مرحله‌ی ۳) موجب شده است چند روش شناسایی سیستم خروجی-محور ایجاد شود از جمله: الگوریتم تجزیه‌ی حوزه‌ی فرکانس^۱ (FDD) [۱۴]، الگوریتم پایش سیستم ویژه^۲ (ERA) [۱۵] و الگوریتم تجزیه به مودهای تجربی^۳ (EMD) [۱۶].

۲-۳- مطالعات انجام شده روی اندرکنش پل_خودرو عبوری

رفتار تیرها تحت تأثیر بار متحرک، تاکنون توسط محققین مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. بسیاری از مطالعات به منظور شبیه‌سازی حرکت خودرو بر روی پل صورت پذیرفته است. برخی از محققین سیستم متحرک را به صورت بار ثابت شبیه‌سازی کرده‌اند و برخی آن را با سیستم‌هایی شامل جرم، فنر و میرا کننده شبیه‌سازی نموده‌اند.

با توجه به هدف مورد نظر تعداد درجات آزادی در نظر گرفته شده برای خودرو و پل، و نیز با توجه به هندسه در نظر گرفته شده و بسیاری از معیارهای مؤثر دیگر، موضوع ارتعاشات پل‌ها در اثر عبور بار، بسیار گسترده است؛ و تاکنون مطالعات فراوانی در این زمینه صورت گرفته است که در این بخش به برخی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین این مطالعات اشاره می‌گردد.

Hino و Yoshimura در سال ۱۹۸۶ طی دو مقاله، ارتعاشات تیر مستقیم با تکیه‌گاه ساده در اثر عبور سیستم جرم، فنر و میرا کننده را مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. آن‌ها در حل معادلات از دو روش

^۱- Frequency Domain Decomposition

^۲- Eigensystem realization algorithm

^۳- Empirical Mode Decomposition

توزیع خطا^۱ و روش المان محدود^۲ استفاده کردند.

هومار و همکاران در سال ۱۹۹۵، پاسخ دینامیکی پل‌ها تحت اثر وسیله نقلیه که به صورت یک نوسان‌گر متحرک مدل‌سازی شده بود، مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. در این پژوهش عرشه پل به شکل دال و وسیله نقلیه به صورت نوسان‌گر تک درجه آزادی مدل گردیده است.

در سال ۱۹۹۹ مارکسیه‌لو و همکاران، رفتار دینامیکی پل‌های مستقیم چند دهانه را بر اساس مدل سیستم متحرک چند درجه آزادی مورد بررسی قرار دادند [۱۹].

Michalatsos (۲۰۰۱)، ارتعاشات پل را در اثر عبور بار بررسی کرد [۲۰]. او پل را با یک تیر مستقیم با تکیه‌گاه ساده شبیه‌سازی نمود. او تأثیر شتاب بار متحرک بر ارتعاشات تیر را مورد بررسی قرار داد. وی نتایج تحقیقات خود را به شرح زیر ارائه داد:

۱- اثر تغییرات سرعت بار بر خیز پل قابل ملاحظه است و می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

۲- شبیه‌سازی خودرو متحرک با دو محور، نسبت به شبیه‌سازی آن با یک محور، دارای دقت بسیار بالاتری است.

۳- اثرات میراکننده خارجی در ارتعاشات تیر ناچیز است و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

Senthilvasan و همکاران در سال ۲۰۰۱ پاسخ دینامیکی پل با انحنای افقی را مورد بررسی قرار دادند [۲۰]. آن‌ها مطالعات خود را با روش تجربی انجام دادند و پایداری خودرو را در حین عبور از روی پل بررسی کردند. آن‌ها نتایج تحقیقات خود را به شرح زیر ارائه کردند:

۱- برای مواردی که نسبت وزن خودرو به وزن پل از ۳۵ درصد کمتر باشد، در نظر گرفتن

¹ - Weighted Residual Method

² - Finite Element Method

خودرو به صورت بار متحرک مناسب خواهد بود و با دقت قابل قبولی پاسخ دینامیکی سیستم را پیش‌بینی خواهد کرد.

۲- دامنه ارتعاشات پل همواره با افزایش سرعت خودرو، افزایش نخواهد یافت؛ بلکه در سرعت‌های خاصی کاهش می‌یابد.

۳- مودهای ارتعاشی پیچشی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ دینامیکی پل، به‌ویژه در شرایط نامتقارن خواهند داشت.

زرفام و همکاران در سال ۲۰۱۲، رفتار دینامیکی تیر با شرایط تکیه‌گاهی زلزله را مورد بررسی قرار دادند [۲۱].

۲-۴- تاریخچه‌ی روش جداسازی سیگنال‌های ناپیدا

تکنیک‌های جداسازی سیگنال‌های ناپیدا، اولین بار در اوایل دهه ۸۰ میلادی برای پردازش سیگنال در زمینه مدل‌سازی شبکه عصبی^۱ مطرح شد. در دو دهه اخیر مطالعات گسترده‌ای روی این مقوله شکل گرفته و زمینه کاربرد آن را در زیرشاخه‌های مختلف علم فراهم کرده است.

کاربرد تکنیک‌های BSS برای تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های چند متغیره مانند سری زمانی مالی [۲۲]، مجموعه داده‌های فیزیک نجومی [۲۳]، امواج الکتریکی و همودینامیکی ضبط شده از مغز انسان [۲۴] و تصاویر طبیعی دیجیتالی [۲۵]. اثبات شده است. همچنین تکنیک‌های BSS در زمینه دینامیک سازه شامل تشخیص آسیب [۲۶] و پایش وضعیت [۲۷ و ۲۸] به‌کار گرفته شده است. در سال ۲۰۰۵ نشریه‌ای به صورت ویژه در مورد استفاده از BSS در سیستم‌های دینامیکی و پردازش سیگنال منتشر شد [۲۹]. با این حال استفاده از BSS در زمینه دینامیک سازه هنوز به صورت یک چالش باقی مانده است [۳۰]؛ به این علت که پاسخ زمانی سیستم‌های مکانیکی به

¹ -Neural Network

تحریکی که از ترکیب کانولوتیو ایجاد می‌شود، وابسته است که این ترکیب نسبت به ترکیب استاتیکی بسیار پیچیده است.

ساوادا در سال ۲۰۰۴ روش جداسازی کور منابع را به دو دسته‌ی کلی زمانی و فرکانسی تقسیم نمود، طبق تحقیق او در روش زمانی، پیچیدگی محاسباتی زیاد است و در روش فرکانسی مشکل جایگشت وجود دارد [۳۱]. ICA یکی از الگوریتم‌های روش BSS است که قابلیت جداسازی سیگنال منابع را هم در حوزه زمان و هم فرکانس دارد [۳۲].

۲-۵- عیب‌یابی پل

کو و همکاران در سال ۲۰۰۲ به عیب‌یابی مدل پل Kap Shui Mun در هنگ کنگ پرداختند [۳۳]. بدین منظور از یک روش چند مرحله‌ای مبتنی بر شبکه عصبی استفاده کرد. بدین نحو که در مرحله اول وجود خرابی در پل با استفاده از اختلاف فرکانس سازه معیوب و سالم تعیین می‌شود. در مرحله بعد مکان خرابی با استفاده از انحنای مود شکل مشخص می‌شود. در انتها شدت خرابی با استفاده از ترکیبی از پاسخ‌های دینامیکی پیدا می‌شود.

در سال ۲۰۰۵ یونگ یک پل معلق واقعی را که بیش از ۱۰۰ سال عمر دارد را با اجزاء محدود مدل کرده و با دو شبکه PRAN^۱ و DIGNET به عیب‌یابی آن پرداخت. برای ورودی شبکه از فرکانس به اضافه مود شکل استفاده کرد [۳۴].

در سال ۲۰۰۴ جانگ جالی و همکاران یک پل با چندین شاه تیر را با شبکه انتشار برگشتی (BPNN^۲) عیب‌یابی کرد. برای ورودی شبکه از نسبت مود شکل حالت معیوب به سالم استفاده کرد که اثر خطای مدل سازی را کم می‌کند [۳۵]. همچنین این محققین روش پیشنهادی خودشان را در سال ۲۰۰۵ بر روی پل Hannam Grand در سئول کره جنوبی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفت

^۱ Probabilistic Resource Allocating Networks

^۲ Back Propagation Neural Network

در خرابی های واقعی و روی سازه های بزرگ مقیاس هم روش آنها مکان خرابی را با دقت خوبی پیش بینی می کند [۳۶].

در سال ۲۰۰۴ هونگ و همکاران به بررسی جامعی در مورد کاربرد سنسورهای فیبر نوری در پایش سلامت انواع سازه ها پرداختند [۳۷]. بدین منظور آنها سازه های پل، سد، ساختمان، تونل و... را مورد بررسی قرار دادند.

جیکو و گیونی در سال ۲۰۰۵ بررسی جامعی روی روش های مختلف عیب یابی پل ها با استفاده از سنسور گذاری مختلف و تکنولوژی های مدرن دریافت و پردازش داده ها انجام دادند [۳۸]. بررسی ها نشان می داد با استفاده از امکانات ناشی از تکنولوژی های جدید امکان پایش سلامت پل ها و همچنین نگهداری و ترمیم آنها را با سرعت و دقت بیشتری فراهم می کند و باعث افزایش طول عمر، یکپارچگی و قابلیت اطمینان پل ها می شوند.

شنگ نان و همکاران در سال ۲۰۰۶ مدل بزرگ مقیاس یک پل سه دهانه بتنی را در آزمایشگاه مورد بررسی قرار دادند [۳۹]. بدین منظور این پل در مقیاس یک چهارم در آزمایشگاه مدل شده و سپس تحت بارگذاری های مختلف قرار گرفت. بررسی های آنها نشان می دهد با استفاده از پاسخ انحنای مد شکل می توان مکان خرابی را با دقت بسیار خوبی تعیین کرد.

در سال ۲۰۰۸ مهرجو و همکاران اتصالات یک پل خرپایی را با شبکه عصبی انتشار بازگشتی (BPNN) عیب یابی کردند. فرکانس به اضافه مدشکل خرپا را به عنوان ورودی شبکه و محل و درصد خرابی گره ها را به عنوان خروجی شبکه به کار برد. به علاوه در عیب یابی پل خرپایی از ساختار زیر سازه استفاده کردند [۴۰]. چنگ در سال ۲۰۰۹ به عیب یابی پل بتنی کابلی با استفاده از ماشین بردار پشتیبان پرداخت [۴۱]. در این پژوهش ایشان پل جینما را مدل کردند. دهانه این پل ۲۸۳ متر و طول آن ۱۹۱۳ متر می باشد. برای عیب یابی از انحنای مود شکل به عنوان ورودی الگوریتم استفاده

شد. نتایج بیانگر آن است که روش پیشنهادی در این مقاله شدت خرابی در کابل‌های این پل بتنی را با دقت خوبی پیش بینی می‌کند.

در سال ۲۰۱۲ هستر و گنزالز از روش موجک به منظور عیب یابی پل‌ها استفاده کردند [۴۲]. بدین منظور از پاسخ‌های حاصل از ارتعاش سازه به هنگام عبور ماشین آلات استفاده کردند. هم‌چنین به منظور افزایش دقت تشخیص خرابی روش مبتنی بر انرژی بسته‌های موجکی پیشنهاد کردند.

در سال ۲۰۱۳ ژیانپنگ و همکاران با استفاده از روشی مبتنی بر اطلاعات آماری حاصل از پاسخ دینامیکی پل‌های راه آهن به عیب یابی آنها پرداختند [۴۳]. بدین منظور از شبکه عصبی BP استفاده شد. نتایج بیانگر آن بود روش پیشنهادی مکان خرابی را در وسط دهانه پل را با دقت خوبی پیش بینی می‌کند اما اگر مکان خرابی در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها باشد دقت روش پایین می‌آید.

در سال ۲۰۱۴ چون چانگ و همکاران امکان تشخیص خرابی در پل‌ها را با استفاده از ارتعاش ناشی از عبور وسایل حمل و نقل عمومی مورد بررسی قرار دادند [۴۴]. بدین منظور مدل آزمایشگاهی پل را تحت تاثیر سه نوع ماشین مختلف و دو نوع سرعت مختلف قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند با استفاده از شاخصی مبتنی بر نسبت سختی خمشی اعضا خراب نسبت به حالت سالم می‌توان مکان خرابی را با دقت خوبی مشخص کرد. هم‌چنین در سال ۲۰۱۴ طالب نجات و همکاران به بررسی روش‌های مختلف عیب یابی بر روی پل‌ها پرداختند [۴۵]. آنها به منظور بررسی عیب در پل معلق Alfred Zampa Memorial در کالیفرنیا حالت‌های مختلف خرابی مانند خرابی در عرشه و یا کابل‌ها را مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین انواع روش‌های تشخیص عیب مانند استفاده از تغییرات نرمی، استفاده از سختی و استفاده از بارگذاری‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

فصل سوم:

پایش سلامت سازه‌ی پل

۳-۱- پیش‌گفتار

در اغلب تکنیک‌های پایش سلامت مبتنی بر ارتعاش، به منظور بازرسی خصوصیات دینامیکی، تعداد زیادی حس‌گر روی سازه نصب می‌شوند. چنین رویکردی که در آن، حس‌گرها به طور مستقیم روی پل نصب شوند، پایش مستقیم نامیده می‌شود. اما در صورتی که حس‌گر، روی خودرویی با مشخصات معلوم نصب شود و سپس از روی پل مورد نظر عبور کند، از آن به عنوان پایش غیرمستقیم یاد می‌شود. ایده‌ی رویکرد غیرمستقیم، اول بار توسط آقای یانگ طرح گردید [۴۶] و [۴۷].

رویکرد غیرمستقیم در مقایسه با روش‌های مستقیم برتری‌های زیادی دارد که از آن جمله می‌توان به نیاز کمتر به تجهیزات، پرسنل متخصص در محل، هزینه‌ی کمتر، سادگی، کارایی، و قابل حمل بودن اشاره نمود. هم‌چنین در مواقعی که نتوان ترافیک جاری را محدود کرد، پایش غیرمستقیم بسیار کارآمد خواهد بود.

در این فصل از نوشتار حاضر، ابتدا روش پایش مستقیم توضیح داده می‌شود. در همین راستا، مدل‌سازی پل به دو صورت تیر مستقیم و تیر خمیده انجام گردیده و معادلات حاکم بر مسأله بیان می‌شود. در قسمت بعد، روش پایش غیرمستقیم بیان می‌شود و مدل‌سازی خودرو به صورت یک محوره و دو محوره انجام گردیده و معادلات لازم ارائه می‌شود. در انتهای فصل نیز، نحوه‌ی شناسایی محل آسیب در سازه‌ی پل با استفاده از روش انحنای شکل مودی بیان خواهد شد.

۳-۲- پایش مستقیم

جهت انجام پایش سلامت پل، نیاز است تا خصوصیات دینامیکی پل در نقاط مختلف به دست آیند و مورد بررسی قرار گیرند. در این بخش، از پایش مستقیم استفاده شده است. همان‌طور که در

پیش‌گفتار به این روش اشاره گردید، در این رویکرد حس‌گرهایی به طور مستقیم روی پل نصب می‌شوند و خودرویی به عنوان محرک از روی پل عبور می‌کند.

تئوری حل مسأله به این صورت است که، پل و خودروی عبوری به ترتیب به صورت تیر الاستیک با دو انتهای مفصلی و سیستم جرم-فنر مدل‌سازی شده است. تیر به روش اجزای محدود المان‌بندی شده است. سیستم جرم-فنر نیز شامل دو جرم است که به وسیله‌ی فنر و میراگر به هم متصل شده‌اند و بیان‌گر جرم بدنه‌ی خودرو و چرخ‌ها هستند.

در مدل‌سازی پل، هر دو حالت تیر مستقیم و تیر خمیده مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر، یک بار پل به صورت تیر مستقیم مدل‌سازی شده است و با استفاده از روابط تیر اویلر-برنولی، معادلات اندرکنش نوشته شده و تحلیل صورت گرفته است و بار دیگر از تیر خمیده و روابط مربوط به تیر تیموشنکو برای مدل‌سازی پل استفاده شده است.

۳-۲-۱- اندرکنش پل مستقیم و خودروی عبوری

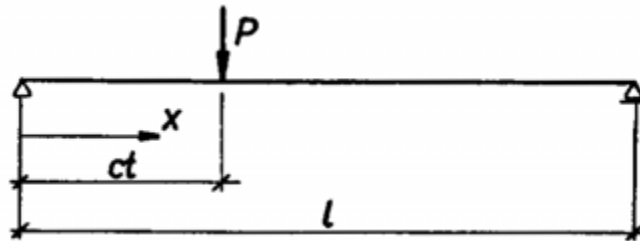
برای بیان اندرکنش پل-خودرو از مدل ریاضی خودروی تست عبوری بر روی یک پل ساده استفاده شده است. در حالت کلی، پل را می‌توان به صورت یک تیر اویلر-برنولی با دو انتهای مفصلی مدل‌سازی کرد که تحت عبور خودرو قرار گرفته است، اما برای مدل‌سازی خودرو حالات مختلفی را می‌توان لحاظ کرد. مدل‌سازی خودرو، می‌تواند به صورت یک نیروی متمرکز یا جرمی باشد که در سراسر تیر حرکت می‌کند اما وضعیتی که بتواند رفتار خودرو را بهتر مدل‌سازی کند، استفاده از یک سیستم جرم-فنر متحرک است. در زیر هر سه حالت، به طور جداگانه ذکر شده است و معادلات تحلیل مربوط به آن‌ها ارائه گردیده است.

۳-۲-۱-۱- تحلیل دینامیکی تیر مستقیم تحت اثر نیروی متمرکز متحرک

در این بخش، مسأله‌ی ساده‌تر حرکت یک نیروی متمرکز بر روی پل، که به صورت تیری

مستقیم از نوع اوپلر - برنولی مدل سازی شده است، مورد بررسی قرار می گیرد. در این تحلیل فرض می شود که بار، ناشی از یک نیروی خالص است و یا چنانچه دارای جرم باشد، این جرم در برابر جرم تیر ناچیز بوده و اثرات اینرسی آن قابل صرف نظر است. نتایج حاصل از بررسی این مسأله را می توان به عنوان مبنایی برای بررسی صحت نتایج به دست آمده از مسائل پیچیده تر استفاده کرد.

یک تیر یکنواخت با شرایط مرزی دلخواه در نظر گرفته می شود که نیرویی با سرعت ثابت c از یک طرف آن وارد شده و روی آن حرکت می کند و از انتهای دیگر خارج می شود. در شکل (۱-۳) صورت شماتیک مسأله برای حالت تکیه گاه ساده رسم شده است.



شکل ۱-۳: تیر مستقیم تحت اثر نیروی متمرکز متحرک

با استفاده از فرضیات تیر اوپلر- برنولی و به کارگیری اصل همیلتون^۱، معادله ی حاکم بر مسأله به صورت زیر به دست می آید [۴۸]:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] + \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \delta(x - ct) P \quad (1-3)$$

در معادله بالا EI ، ρ ، A و W به ترتیب بیان گر سختی خمشی، چگالی، سطح مقطع و خیز تیر است. همان طور که در شکل هم نشان داده شده است، P مقدار نیروی متمرکزی است که در طول تیر با سرعت ثابت c حرکت می کند. همچنین $\delta(x)$ معرف تابع تعمیم یافته دایراک^۲ است که به صورت

^۱ -Hamilton Principles

^۲ -Dirac Delta

مشتق تابع هویساید^۱ تعریف می‌شود:

$$\delta(x) = \frac{dH(x)}{dx} \quad (۲-۳)$$

با استفاده از گسسته‌سازی تیر به روش المان محدود، ماتریس‌های جرم و سختی المان تیر محاسبه خواهند شد. در این جا از توابع درونیاب درجه سه هرmitesی^۲ استفاده شده است. از این رو، ماتریس جرم و سختی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$m_j = h \int_0^1 \mu_j(\xi) NN^T d\xi \quad (۳-۳)$$

$$k_j = \frac{1}{h^3} \int_0^1 EI_j(\xi) \frac{d^2 N}{d\xi^2} \frac{d^2 N^T}{d\xi^2} d\xi \quad (۴-۳)$$

در رابطه‌ی فوق، ξ مختصات محلی المان و N بردار توابع درونیاب است که در محل قرارگیری نیروی متمرکز، مقداردهی می‌شود. پارامتر h نیز طول هر المان را بیان می‌کند. با توجه به ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی کل سازه، معادله‌ی حرکت حاکم بر مسأله به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = \{f(t)\} = \{N^T\}P \quad (۵-۳)$$

در رابطه‌ی بالا $[M]$ ، $[K]$ و $[C]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی کل سازه هستند، هم‌چنین $\{\ddot{d}\}$ ، $\{\dot{d}\}$ و $\{d\}$ به ترتیب بیان‌گر بردار شتاب، سرعت و جابه‌جایی گرهی تیر هستند. میرایی سازه نیز از نوع رایلی-ریتز است و به صورت زیر بیان می‌شود:

¹ -Heaviside

² -Hermitian Cubics

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (۶-۳)$$

در رابطه‌ی فوق، α و β به ترتیب ضرایب ماتریس جرم و سختی هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۴۹]:

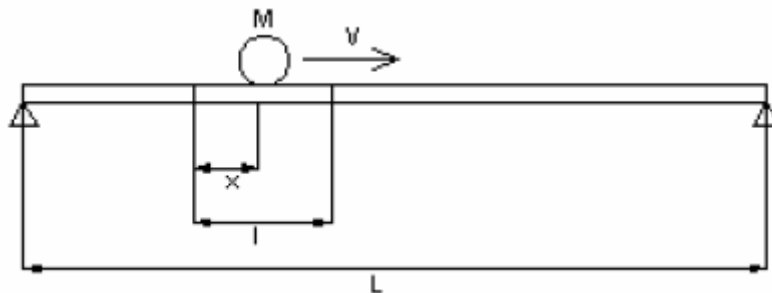
$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{(\omega_2^2 - \omega_1^2)} \quad (۷-۳)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1)}{(\omega_2^2 - \omega_1^2)} \quad (۸-۳)$$

در معادلات بالا، ω_1 و ω_2 فرکانس‌های اصلی و ξ_1 و ξ_2 ضرایب میرایی تیر هستند.

۲-۱-۲-۳ - تحلیل دینامیکی تیر مستقیم تحت اثر یک جرم متحرک

هنگامی که اثر وزن بار متحرک و سازه‌ی تحت اثر آن، هیچ‌یک قابل صرف‌نظر نباشد، تحلیل دینامیکی مسأله اندکی پیچیده‌تر خواهد شد. در این بخش، بار نه به عنوان یک نیروی متمرکز بلکه به صورت یک جرم متمرکز در حال حرکت، در نظر گرفته می‌شود. در چنین حالتی اثرات اینرسی بار نیز به تحلیل افزوده خواهد شد. این امر، گامی در جهت مدل‌سازی حقیقی‌تر سیستم‌های مورد نظر می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است، جرم متمرکز M از روی تیری مستقیم به طول L با سرعت ثابت V حرکت می‌کند.



شکل ۲-۳: تیر مستقیم با تکیه‌گاه ساده تحت جرم متحرک

مدل سازی بار به صورت جرم متحرک، سبب می شود که از معادله ی قانون دوم نیوتن، علاوه بر نیروی حاصل از وزن بار، عبارت دیگری نیز که تابع مشتق کامل خیز است و اثرات اینرسی بار را نشان می دهد، به معادله افزوده شود. معادله ی دیفرانسیل ارتعاشات اجباری تیر اویلر-برنولی به صورت رابطه ی زیر بیان می شود [۴۸]:

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = \delta(x-vt)P \quad (۹-۳)$$

که در آن،

$$P = M_p g - M_p \frac{d^2 w(x,t)}{dt^2} \quad (۱۰-۳)$$

در رابطه ی (۱۰-۳)، اولین عبارت سمت راست معادله، نشان دهنده ی نیروی ثابت وزن جرم متحرک است و عبارت دوم، معرف اثر اینرسی است که کاملاً تابع حرکت تیر است. بنابراین در این حالت، مقدار نیروی اعمال شده از طرف بار تابع پاسخ سیستم است و از این جهت سبب پیچیدگی حل معادله می شود. علاوه بر این با در نظر گرفتن مشتق اول و دوم خیز تیر در محل تماس لحظه ای بار و تیر خواهیم داشت:

$$\dot{W}(x,t) = \frac{\partial W}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial W}{\partial t} \quad (۱۱-۳)$$

$$\ddot{W}(x,t) = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \dot{x}^2 + 2 \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial t} \dot{x} + \frac{\partial W}{\partial x} \ddot{x} + \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \quad (۱۲-۳)$$

عبارت $W(x,t)$ که مربوط به خیز تیر است، می تواند به صورت حاصل ضرب ماتریس توابع درونیاب و بردار درجات آزادی گرهی به صورت زیر بیان شود:

$$W = [N] \{d\} \quad (13-3)$$

اکنون با جایگذاری رابطه (۱۳-۳) در روابط (۱۱-۳) و (۱۲-۳) و با توجه به این نکته که تابع درونیاب N تنها به متغیر مکان وابسته است و مستقل از زمان می‌باشد و نیز بردار درجات آزادی d تابعی از زمان است، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} &= [N]_{xx} \{d\}, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial t} = [N]_x \{d\dot{\ } \} \\ \frac{\partial W}{\partial x} &= [N]_x \{d\}, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = [N] \{\ddot{d}\} \end{aligned} \quad (14-3)$$

در روابط فوق، زیرنویس x و بالانویس نقطه به ترتیب برای بیان مشتق‌گیری نسبت به متغیر مکان و زمان استفاده شده است. اکنون با جایگذاری روابط بدست آمده، در معادله‌ی حرکت نوشته شده مطابق با رابطه (۵-۳) و با این فرض که جرم متحرک با سرعت ثابت در طول تیر حرکت می‌کند، معادله‌ی حرکت حاکم بر مسأله به صورت زیر به دست می‌آید:

$$[M + M^*] \{\ddot{d}\} + [C^*] \{d\dot{\ } \} + [K + K^*] \{d\} = M_p g [N^t] \quad (15-3)$$

که در رابطه‌ی فوق ماتریس‌های $[M^*]$ ، $[C^*]$ و $[K^*]$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

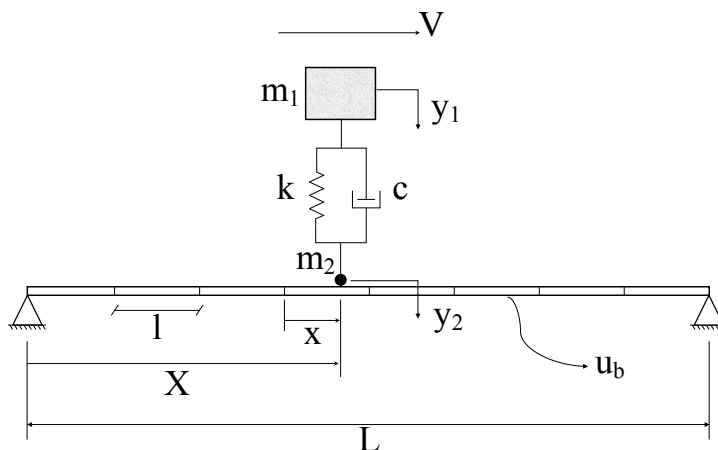
$$\begin{aligned} [M^*] &= M_p [N^t] [N] \\ [C^*] &= 2M_p v [N^t] [N]_x \\ [K^*] &= M_p v^2 [N^t] [N]_{xx} \end{aligned} \quad (16-3)$$

۳-۱-۲-۳ - تحلیل دینامیکی تیرمستقیم تحت اثر سیستم جرم-فنر متحرک

تاکنون به بررسی تیر ساده‌ای که تحت اثر نیرو و جرم متحرک، به طور جداگانه قرار گرفته بود، پرداخته شده است. اما در این بخش، حالت پیچیده‌تری مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این ترتیب که خودرو به صورت یک سیستم متشکل از جرم_فنر مدل‌سازی می‌شود و در طول تیر حرکت می‌کند.

تیر نیز هم‌چنان از نوع اویلر-برنولی و با تکیه‌گاه مفصلی در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، خودرو به صورت یک سیستم جرم-فنر مدل‌سازی شده است. این سیستم متحرک شامل دو جرم است که با مجموعه‌ای از فنرها و میراگرها به یک‌دیگر متصل شده‌اند. m_1 نشان‌دهنده‌ی جرم بدنه‌ی خودرو و سوار بر فنر است در حالی که m_2 بیان‌گر جرم چرخ‌های خودرو و در تماس با تیر است. پل نیز به صورت یک تیر اویلر-برنولی، الاستیک و با دو انتهای مفصلی، به طول L و جرم مخصوص m و صلبیت خمشی EI در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۳: تیر مستقیم مدل‌سازی شده در معرض حرکت سیستم جرم-فنر

در شبیه‌سازی ذکر شده از فرضیات زیر استفاده می‌شود بدون این‌که به عمومیت مسأله آسیبی

وارد گردد:

۱. از ناهمواری سطح جاده صرف‌نظر می‌شود.
۲. وزن خودرو در مقایسه با جرم پل بسیار کوچک می‌باشد.
۳. قبل از ورود خودروی تست، پل در حالت استراحت می‌باشد، به عبارتی شرایط اولیه‌ی صفر برای پل در نظر گرفته می‌شود. این یک فرض منطقی است، زیرا ارتعاشات پل ناشی از تحریکات محیطی در مقایسه با نیروهای خودروی عبوری آن‌قدر کوچک

هستند که بتوان از آن‌ها چشم‌پوشی کرد.

۴. از اثر میرایی پل و خودرو صرف‌نظر می‌شود. این فرض نیز قابل پذیرش است، به این

دلیل که ارتعاشات هر دو به صورت واداشته است.

۵. خودرو با سرعت ثابت V از روی پلی که به صورت یک تیر اویلر-برنولی با سطح مقطع

یکسان در تمام طولش می‌باشد، عبور می‌کند.

معادلات حاکم بر حرکت سیستم متحرک جرم-فنر و تیر با استفاده از روابط اجزای محدود به ترتیب

زیر ارائه شده است [۵۰]:

$$m_1 \ddot{y} + c(\dot{y} - \dot{w}_0) + k(y - w_0) = 0 \quad (۱۷-۳)$$

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = \{f\} = [N]^T f_0 \quad (۱۸-۳)$$

که در آن،

$$f_0 = (m_1 + m_2)g - m_2 \ddot{w}_0 + F_T \quad (۱۹-۳)$$

$$F_T = k(y - w_0) + c(\dot{y} - \dot{w}_0) \quad (۲۰-۳)$$

در روابط فوق، متغیر w_0 بیان‌گر جابه‌جایی عمودی جرم m_2 است که با مقدار جابه‌جایی نقطه‌ی

تماس تیر برابر است. نیروی F_T به صورت زیر نیز قابل بیان است:

$$F_T = F - m_1 \ddot{y} \quad (۲۱-۳)$$

در رابطه بالا، متغیر F مقدار نیروی خارجی وارد بر جرم m_1 را نشان می‌دهد. در این‌جا چون هیچ

نیروی به آن وارد نمی‌شود، مقدار صفر برای آن لحاظ می‌گردد. با جایگذاری رابطه بالا در رابطه (۳-۳)

(۱۹)، معادله زیر بدست می‌آید:

$$f_0 = m_1(g - \ddot{y}) + m_2(g - \ddot{w}_0) \quad (22-3)$$

مشتقات w_0 مطابق با روابط زیر بدست می‌آید:

$$\dot{w}_0(x, t) = \frac{\partial w}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial w}{\partial t} \quad (23-3)$$

$$\ddot{w}_0(x, t) = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \dot{x}^2 + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \dot{x} + \frac{\partial w}{\partial x} \ddot{x} + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

عبارت $w(x, t)$ به صورت حاصل ضرب تابع شکل در جابه‌جایی گرهی تیر طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$w = [N] \{d\} \quad (24-3)$$

در این جا از توابع شکل مکعب هرمیتی درجه ۳ مطابق با روابط زیر استفاده می‌شود:

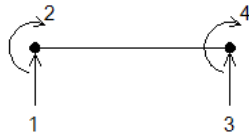
$$[N] = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \quad (25-3)$$

به طوری که:

$$N_1 = 1 - 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{l}\right)^3, N_2 = x\left(\frac{x}{l} - 1\right)^2 \quad (26-3)$$

$$N_3 = 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3, N_4 = x\left[\left(\frac{x}{l}\right)^2 - \frac{x}{l}\right]$$

بردار $\{d\}$ نیز شامل ۴ درجه آزادی برای هر المان است، به این صورت که مطابق با شکل ۲-۳ هر گره دارای یک جابه‌جایی عمودی و یک دوران می‌باشد.



شکل ۳-۴: درجات آزادی هر المان تیر

با جایگذاری رابطه (۳-۲۴) در روابط (۳-۲۲) و (۳-۲۳) و توجه به این نکته که $[N]$ تنها به متغیر مکان وابسته است و بردار $\{d\}$ تابعی از زمان است، روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= [N]_{xx} \{d\}, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} = [N]_x \{\dot{d}\} \\ \frac{\partial w}{\partial x} &= [N]_x \{d\}, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = [N] \{\ddot{d}\} \end{aligned} \quad (۳-۲۷)$$

اکنون با جایگذاری روابط (۳-۲۲) و (۳-۲۳) در روابط (۳-۱۷) و (۳-۱۸)، معادله اندرکنش تیر و سیستم جرم_فنر به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} &\begin{pmatrix} [M] + [m]^* & \{0\} \\ [0] & m_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{\ddot{d}\} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [C] + [c]^* & -c [N]^T \\ -c [N] & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{\dot{d}\} \\ \dot{y} \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} [K] + [k]^* & -k [N]^T \\ -cx [N]_x & -k [N] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{d\} \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [N]^T (m_1 + m_2) g \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (۳-۲۸)$$

که در رابطه‌ی فوق ماتریس‌های $[m^*]$ ، $[c^*]$ و $[k^*]$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} [m^*] &= m_2 [N]^T [N] \\ [c^*] &= 2m_2 \dot{x} [N]^T [N]_x + c [N]^T [N] \\ [k^*] &= m_2 \dot{x}^2 [N]^T [N]_{xx} + m_2 \ddot{x} [N]^T [N]_x + k [N]^T [N] + cx [N]^T [N]_x \end{aligned} \quad (۳-۲۹)$$

اکنون معادله‌ی اندرکنش بدست آمده، در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی می‌شود و به کمک روش عددی نیومارک- β حل می‌گردد. خروجی برنامه، ماتریس جرم، سختی و میرایی کل که حالت اسمبل

شده‌ی تمام المان‌ها است، می‌باشد. هم‌چنین سیگنال پاسخ دینامیکی خودرو و نقاط مختلف تیر شامل جابه‌جایی، سرعت و شتاب از برنامه بدست می‌آید.

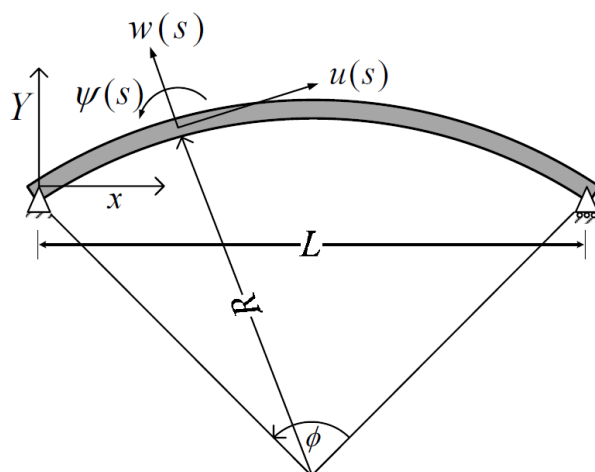
۳-۲-۲- اندرکنش پل خمیده و خودروی عبوری

در قسمت قبل، اندرکنش پل مستقیم و خودرو مورد بررسی قرار گرفت. در آن‌جا، پل به صورت یک تیر از نوع اوپلر_ برنولی مدل‌سازی شده بود. در این بخش، مطالعه روی پل خمیده صورت می‌گیرد و برای مدل‌سازی آن از روابط مربوط به تیر تیموشنکو استفاده می‌شود.

تفاوت اصلی تیر خمیده با تیر مستقیم که سبب شده است، مطالعه‌ی تیرهای خمیده پیچیده‌تر شود به این دلیل است که، تغییرشکل‌ها در این نوع از تیر، علاوه بر دوران و جابه‌جایی شعاعی، با جابه‌جایی‌هی مماسی نیز همراه هستند. تاکنون پژوهش‌های زیادی روی تیرهای مستقیم انجام گردیده است بنابراین مطالعه‌ی این تیرها مبحث جدیدی محسوب نمی‌شود. این درحالیست که پژوهش‌های مربوط به تیرهای خمیده سابقه طولانی ندارند. به همین دلیل امروزه، مهندسان و طراحان سعی کرده‌اند مطالعه بر روی تیر خمیده را گسترش دهند. از دلایل برتری تیر خمیده در مقایسه با تیر مستقیم می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۵۱]:

- استفاده از المان تیر خمیده باعث افزایش سختی کلی سازه می‌گردد.
- تیرهای خمیده محدودیت نسبت طول به ضخامت را ندارند.
- اثرات برشی برای تحلیل تیر خمیده لحاظ می‌شود. در نتیجه تحلیل دقیق‌تری صورت می‌گیرد.

هدف از این بخش، توسعه‌ی معادلات حاکم بر تیر خمیده است. همان‌طور که در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود، اثرات تغییرشکل برشی و دورانی برای آن لحاظ می‌شود.



شکل ۳-۵: درجات آزادی تیر خمیده

برای تحلیل دینامیکی تیر خمیده، از المان‌بندی آن به روش اجزای محدود استفاده می‌شود. هر المان دارای دو گره اصلی در ابتدا و انتهایش است و دو گره میانی نیز برای آن تعریف می‌شود، به طوری‌که تمامی گره‌ها به فواصل یکسان از هم قرار بگیرند. هر گره دارای سه درجه آزادی u ، v و θ است که به ترتیب: جابه‌جایی مماسی، شعاعی و دورانی را در راستای محورهای X ، Y و Z نشان می‌دهد.

معادلات حاکم بر حرکت هر یک از المان‌های دلخواه از تیر، در مختصات محلی (X', Y') به صورت زیر تعریف می‌شود [۵۱]:

$$\begin{aligned} \rho A \ddot{u}' - \frac{\partial}{\partial x'} \left(EA \left(\frac{\partial u'}{\partial x'} \right) \right) - \bar{b}'(x) &= 0 \\ \rho A \ddot{w}' - \frac{\partial}{\partial x'} \left(\kappa GA \left(\frac{\partial w'}{\partial x'} + \theta \right) \right) - \bar{w}'(x) &= 0 \\ \rho I \ddot{\theta} + \kappa GA \left(\frac{\partial w'}{\partial x'} + \theta \right) - \frac{\partial}{\partial x'} \left(EI \frac{\partial \theta}{\partial x'} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (3-30)$$

محورهای محلی x' و y' به ترتیب در راستای طول المان و عمود بر آن قرار گرفته است. در روابط (۳-۳۰) پارامترهای ρ ، A ، E ، I ، G و K به ترتیب بیان‌گر چگالی، سطح مقطع، مدول الاستیسیته، ممان اینرسی، مدول برشی و ضریب اصلاح برشی برای المان تیر هستند. همچنین

پارامترهای \bar{b} و \bar{w} مقدار نیروی خارجی وارد بر المان تیر را در راستای محوری و عرضی نشان می‌دهند، از آنجایی که نیروی محوری به تیر وارد نمی‌شود مقدار \bar{b} صفر می‌باشد. اما \bar{w} همان نیروی متمرکزی است که در راستای محور y' قرار گرفته است و در طول تیر حرکت می‌کند.

گام اول برای دستیابی به ماتریس‌های جرم و سختی تیر تیموشنکو به روش اجزای محدود، اعمال کردن اصل کار مجازی به معادلات حرکت است:

$$\int_{\Omega} \left\{ \rho A \ddot{u}' - \frac{\partial}{\partial x'} \left(EA \left(\frac{\partial u'}{\partial x'} \right) \right) - \bar{b}' \right\} \delta u' d\Omega = 0$$

$$\int_{\Omega} \left\{ \rho A \ddot{w}' - \frac{\partial}{\partial x'} \left(\kappa GA \left(\frac{\partial w'}{\partial x'} + \theta \right) \right) - \bar{w}' \right\} \delta w' d\Omega = 0 \quad (31-3)$$

$$\int_{\Omega} \left\{ \rho I \ddot{\theta} + \kappa GA \left(\frac{\partial w'}{\partial x'} + \theta \right) - \frac{\partial}{\partial x'} \left(EI \frac{\partial \theta}{\partial x'} \right) \right\} \delta \theta d\Omega = 0$$

معادلات فوق با استفاده از روش جداسازی متغیرها^۱ گسسته می‌شوند و معادلات آزمون محلی^۲

زیر حاصل می‌شوند:

$$\tilde{u}'(x, y, t) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi) u_i'(t) = N_u(\xi) u'^e(t)$$

$$\tilde{w}'(x, y, t) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi) w_i'(t) = N_w(\xi) w'^e(t) \quad (32-3)$$

$$\tilde{\theta}(x, y, t) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi) \theta_i(t) = N_{\theta}(\xi) \theta^e(t)$$

در روابط فوق، پارامتر N معرف توابع شکل است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N_u(\xi) = N_w(\xi) = N_{\theta}(\xi) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \quad (33-3)$$

^۱-Variational Method

^۲- Local Trial Function

$$\begin{aligned}
N_1 &= -\frac{9}{16}(\xi-1)\left(\xi-\frac{1}{3}\right)\left(\xi+\frac{1}{3}\right) \\
N_2 &= \frac{27}{16}(\xi-1)(\xi+1)\left(\xi-\frac{1}{3}\right) \\
N_3 &= -\frac{27}{16}(\xi-1)(\xi+1)\left(\xi+\frac{1}{3}\right) \\
N_4 &= \frac{9}{16}(\xi+1)\left(\xi-\frac{1}{3}\right)\left(\xi+\frac{1}{3}\right)
\end{aligned}
\tag{۳۴-۳}$$

با توجه به روابط تعریف شده برای تابع شکل N و مختصات ξ که در آن‌ها استفاده گردید، رابطه‌ی (۳۲-۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned}
\tilde{u}'(\xi, t) &= H_u(\xi)u'_e(t) \\
\tilde{w}'(\xi, t) &= H_w(\xi)u'_e(t) \\
\tilde{\theta}(\xi, t) &= H_\theta(\xi)u'_e(t)
\end{aligned}
\tag{۳۵-۳}$$

که در آن، توابع اینترپولاسیون $H_u(\xi)$ ، $H_w(\xi)$ و $H_\theta(\xi)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}
H_u(\xi) &= [N_u \quad 0 \quad 0] \\
H_w(\xi) &= [0 \quad N_w \quad 0] \\
H_\theta(\xi) &= [0 \quad 0 \quad N_\theta]
\end{aligned}
\tag{۳۶-۳}$$

بردار متغیر $u'_e(t)$ نیز به صورت زیر است:

$$u'_e(t) = [u'^e(t) \quad w'^e(t) \quad \theta^e(t)]^T
\tag{۳۷-۳}$$

توابع آزمون‌ی در فرم نهایی خود به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{Bmatrix} \tilde{u}'(\xi, t) \\ \tilde{w}'(\xi, t) \\ \tilde{\theta}(\xi, t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_u & 0 & 0 \\ 0 & N_w & 0 \\ 0 & 0 & N_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u'^e(t) \\ w'^e(t) \\ \theta^e(t) \end{Bmatrix} = H_e(\xi) u'_e(t) \quad (38-3)$$

که در آن،

$$H_e(\xi) = \begin{bmatrix} H_u(\xi) \\ H_w(\xi) \\ H_\theta(\xi) \end{bmatrix} \quad (39-3)$$

اکنون روابط مورد نیاز برای محاسبه ماتریس‌های سختی خمشی، برشی و محوری به ترتیب زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} K_b &= \int_{\Omega} B_b^T(\xi) D_b B_b(\xi) J(\xi) d\xi \\ K_s &= \int_{\Omega} B_s^T(\xi) G_s B_s(\xi) J(\xi) d\xi \\ K_a &= \int_{\Omega} B_a^T(\xi) D_a B_a(\xi) J(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (40-3)$$

در روابط فوق که از ماتریس‌های گرادیان کرنش خمشی، برشی و محوری استفاده شده است، این ماتریس‌ها به ترتیب، از معادلات زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} B_b(\xi) &= \left[\frac{\partial H_e^\theta(\xi)}{\partial \xi} \right] \\ B_s(\xi) &= \left[\frac{\partial H_e^w(\xi)}{\partial \xi} + H_e^\theta(\xi) \right] \\ B_a(\xi) &= \left[\frac{\partial H_e^u(\xi)}{\partial \xi} \right] \end{aligned} \quad (41-3)$$

و همچنین در روابط (۴۰-۳)، پارامترهای D_b ، G_s و D_a به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$D_b = EI$$

$$G_s = \frac{\kappa AE}{2(1+\nu)} \quad (42-3)$$

$$D_a = EA$$

هم‌چنین:

$$J(\xi) = [J] \quad (43-3)$$

که در آن، $[J]$ ماتریس ژاکوبین المان است.

ماتریس سختی المان در مختصات محلی، از مجموع ماتریس‌های سختی خمشی، برشی و محوری به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$K'^e = K_b + K_s + K_a \quad (44-3)$$

ماتریس جرم المان در مختصات محلی نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M'^e = \int_{\Omega} H_e^T(\xi) \rho H_e J(\xi) d\xi \quad (45-3)$$

پارامتر ρ در رابطه فوق، به صورت زیر ارائه شده است:

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho A & 0 & 0 \\ 0 & \rho A & 0 \\ 0 & 0 & \rho A \end{bmatrix} \quad (46-3)$$

مطابق با روابط ارائه شده، ماتریس‌های جرم و سختی المان در مختصات محلی حاصل شده است.

اکنون برای یک المان دلخواه در فضا با زاویه Φ نسبت به محور X ، مختصات محلی می‌تواند به صورت زیر به مختصات اصلی تبدیل شود:

$$\begin{Bmatrix} u^e(t) \\ w^e(t) \\ \theta^e(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u'^e(t) \\ w'^e(t) \\ \theta^e(t) \end{Bmatrix} \quad (47-3)$$

برای یک المان تیر تیموشنکو که مثل یک المان قاب صفحه‌ای فرض می‌شود و دارای سه متغیر مستقل $U(t)$ ، $W(t)$ و $\theta(t)$ است، ماتریس انتقال از محورهای محلی به اصلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (48-3)$$

اکنون با داشتن ماتریس انتقال، ماتریس‌های المان محلی به صورت زیر به مختصات اصلی تبدیل می‌شوند:

$$K^e = T^T K'^e T \quad (49-3)$$

$$M^e = T^T M'^e T$$

از آن جایی که بار متحرک به صورت یک نیروی متمرکز در راستای محور Y در نظر گرفته می‌شود، خواهیم داشت:

$$W = -mg \quad (50-3)$$

از نیروی گریز از مرکز نیز به علت انحنای تیر، صرف نظر می‌شود.

بردار نیرو برای بار W روی المان e در زمان t ، به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\tilde{f}_m(t) = WT^T \begin{Bmatrix} N_u(\eta(t)) \sin(\phi_e) \\ N_w(\eta(t)) \cos(\phi_e) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (51-3)$$

در رابطه فوق، $\eta(t)$ موقعیت نسبی بار روی المان e است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta(t) = \frac{L_m}{L_e} \quad (52-3)$$

۳-۳- پایش غیرمستقیم

در پژوهش حاضر، پایش سلامت پل به دو روش مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. در قسمت قبل، ضمن معرفی روش پایش مستقیم پل، حالات مختلف مدل‌سازی پل و خودرو مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش، پایش غیرمستقیم معرفی می‌شود. در این رویکرد حس‌گری روی خودروی تست عبوری نصب می‌شود و هم‌زمان با عبور خودرو، پاسخ دینامیکی حاصل از اندرکنش پل-خودرو را ثبت می‌کند. سیگنال دریافت‌شده از حس‌گر، شامل جابه‌جایی، سرعت و شتاب نقاط مختلف پل و خودرو است. در این روش می‌توان خودرو را هم‌زمان هم به عنوان محرک و هم گیرنده در نظر گرفت. آقایان لین و یانگ [۵۲] به صورت آزمایشگاهی و با عبور یک خودروی مجهز به حس‌گر بر روی یک پل بزرگراه در تایوان نشان دادند که این روش در عمل نیز قابلیت اجرا دارد.

در پژوهش حاضر، برای حل تئوری مسأله مشابه با پایش مستقیم، از مدل‌سازی پل و خودروی عبوری به ترتیب به صورت یک تیر الاستیک با دو انتهای مفصلی و سیستم جرم-فنر استفاده می‌شود. در این جا تیر از نوع اوپلر-برنولی است اما برای خودرو دو حالت مدل‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در حالت اول، خودرو به صورت یک سیستم تک محوره مدل‌سازی می‌شود؛ به این صورت که تمام

جرم بدنه‌ی خودرو تحت عنوان جرم m_1 و جرم چرخ‌ها تحت عنوان جرم m_2 در نظر گرفته می‌شود که به وسیله‌ی مجموعه‌ای از فنر و میراگر به هم متصل شده‌اند.

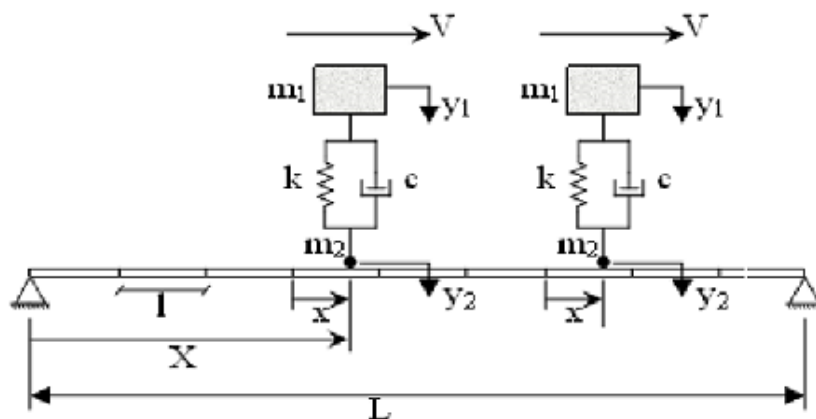
در حالت دوم، برای مدل‌سازی خودرو از دو مجموعه‌ی جرم-فنر که در طول تیر حرکت می‌کنند، استفاده می‌شود. در این حالت، فرض بر این است که در تمام مدتی که سیستم از روی پل عبور می‌کند، هر دو محور در تماس با تیر هستند. هم‌چنین در این وضعیت تعداد المان‌های بیشتری از تیر در اندرکنش، مشارکت دارند.

۳-۳-۱- حالت تک محوره

مدل‌سازی خودرو به صورت تک محوره که در طول تیر مستقیم حرکت می‌کند، کاملاً مشابه با قسمت (۳-۱-۲-۱) می‌باشد. بنابراین با استفاده از روابط بدست آمده برای اندرکنش تیر و سیستم جرم-فنر تحلیل صورت می‌گیرد و پاسخ دینامیکی پل و خودرو بدست می‌آید.

۳-۳-۲- حالت دو محوره

همانطور که در شکل (۴-۳) مشاهده می‌شود، تیر الاستیک در معرض حرکت دو مجموعه‌ی جرم-فنر قرار گرفته است.



شکل ۴-۳: تیر مستقیم مدل‌سازی شده در معرض حرکت سیستم دو محوره

معادلات حاکم بر حرکت تیر، سیستم متحرک اول و دوم به ترتیب، به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = \{f\} = [N_1]^T f_{01} + [N_2]^T f_{02} \quad (53-3)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 + c(\dot{y}_1 - \dot{w}_{01}) + k(y_1 - w_{01}) = 0 \quad (54-3)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + c(\dot{y}_2 - \dot{w}_{02}) + k(y_2 - w_{02}) = 0 \quad (55-3)$$

که در آن:

$$f_{01} = (m_1 + m_2)g - m_2 \ddot{w}_{01} + F_{T1} \quad (56-3)$$

$$F_{T1} = k(y_1 - w_{01}) + c(\dot{y}_1 - \dot{w}_{01}) \quad (57-3)$$

و

$$f_{02} = (m_1 + m_2)g - m_2 \ddot{w}_{02} + F_{T2} \quad (58-3)$$

$$F_{T2} = k(y_2 - w_{02}) + c(\dot{y}_2 - \dot{w}_{02}) \quad (59-3)$$

نیروی F_{Ti} به صورت زیر نیز قابل بیان است:

$$F_{Ti} = F - m_1 \ddot{y}_i \quad (60-3)$$

از آنجایی که نیروی خارجی به جرم m_1 وارد نمی‌شود، خواهیم داشت:

$$f_{01} = m_1(g - \ddot{y}_1) + m_2(g - \ddot{w}_{01}) \quad (61-3)$$

$$f_{02} = m_1(g - \ddot{y}_2) + m_2(g - \ddot{w}_{02}) \quad (62-3)$$

مشتقات w_{0i} مطابق با روابط زیر بدست می‌آید:

$$\dot{w}_{0i}(x, t) = \frac{\partial w_i}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial w_i}{\partial t} \quad (63-3)$$

$$\ddot{w}_{0i}(x, t) = \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} \dot{x}^2 + 2 \frac{\partial^2 w_i}{\partial x \partial t} \dot{x} + \frac{\partial w_i}{\partial x} \ddot{x} + \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2}$$

تابع $w_i(x, t)$ که از حاصلضرب توابع درونیاب در بردار درجات آزادی تیر بدست می‌آید، به صورت

زیر قابل مشاهده است:

$$w_i = [N_i] \{d\} \quad (۶۴-۳)$$

در این جا نیز از توابع مکعب هرمیتی درجه ۳ که در رابطه (۲۶-۳) ارائه شده است، به عنوان توابع درونیاب استفاده می شود.

با جایگذاری رابطه (۶۴-۳) در رابطه (۶۳-۳)، معادلات زیر حاصل می شوند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} &= [N_i]_{xx} \{d\}, \quad \frac{\partial^2 w_i}{\partial x \partial t} = [N_i]_{x} \{\dot{d}\} \\ \frac{\partial w}{\partial x} &= [N_i]_{x} \{d\}, \quad \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = [N_i] \{\ddot{d}\} \end{aligned} \quad (۶۵-۳)$$

اکنون با جایگذاری روابط بدست آمده در معادلات حرکت تیر و دو مجموعه‌ی جرم_فنر، رابطه‌ی اصلی اندرکنش تیر و سیستم دینامیکی متحرک به صورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [M] + [m]^* & \{0\} & \{0\} \\ [0] & m_1 & 0 \\ [0] & 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{d}\} \\ \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] + [c]^* & -c [N_1]^T & -c [N_2]^T \\ -c [N_1] & c & 0 \\ -c [N_2] & 0 & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{d}\} \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{Bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} [K] + [k]^* & -k [N_1]^T & -k [N_1]^T \\ -c x [N_1]_x - k [N_1] & k & 0 \\ -c x [N_2]_x - k [N_2] & 0 & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{d\} \\ y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^2 [N_i]^T (m_1 + m_2 g) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (۶۶-۳)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}
[m^*] &= m_2 \sum_{i=1}^2 [N_i]^T [N_i] \\
[c^*] &= 2m_2 \dot{x} \left(\sum_{i=1}^2 [N_i]^T [N_i]_x \right) + c \left(\sum_{i=1}^2 [N_i]^T [N_i] \right) \\
[k^*] &= m_2 \dot{x}^2 \left(\sum_{i=1}^2 [N_i]^T [N_i]_{xx} \right) + m_2 \ddot{x} \left(\sum_{i=1}^2 [N_i]^T [N_i]_x \right) + k \left(\sum_{i=1}^2 [N_i]^T [N_i] \right) \\
&+ c \dot{x} \left(\sum_{i=1}^2 [N_i]^T [N_i]_x \right)
\end{aligned} \tag{۶۷-۳}$$

اکنون که معادله‌ی اندرکنش بین تیر و سیستم‌های متحرک بدست آمده، در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی انجام می‌شود و به کمک روش عددی نیومارک- β حل می‌گردد.

۳-۴- شناسایی محل آسیب

پایش سلامت سازه و تشخیص به موقع آسیب‌های موجود در آن، از موضوعات مهمی است که توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است. رویداد آسیب در یک سازه موجب تغییر در خصوصیات فیزیکی‌اش می‌شود و در پی آن، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در خصوصیات دینامیکی سازه اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال افت سختی در قسمتی از یک سازه با افزایش انحنای در همان قسمت همراه است. بر اساس این که کدام یک از مشخصات دینامیکی یا خصیصه‌ی آسیب لحاظ گردند، روش‌های شناسایی آسیب را می‌توان به صورت کلی به چهار گروه زیر تقسیم نمود [۵۳].

۱. روش‌های مبتنی بر فرکانس طبیعی؛

۲. روش‌های مبتنی بر شکل مود؛

۳. روش‌های مبتنی بر انحناء/کرنش شکل مودی؛

۴. سایر روش‌های مبتنی بر پارامترهای مودال.

تمامی این روش‌ها را می‌توان به یک پل اعمال نمود چرا که اغلب، آن‌ها را می‌توان به صورت سازه‌هایی متشکل از تیر و صفحه فرض نمود. پژوهش حاضر به تعیین محل دقیق خرابی در سازه‌ی پل بر اساس تغییرات انحنای اشکال مودی می‌پردازد.

انحنای اشکال مودی مرتبط با سختی خمشی سازه است و از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است [۵۴]:

$$v'' = \frac{M}{EI} \quad (۶۸-۳)$$

در رابطه‌ی فوق، v'' انحنای شکل مود را نشان می‌دهد و M ، E ، I به ترتیب بیان‌گر لنگر خمشی، مدول الاستیسیته و ممان اینرسی سطح مقطع هستند. هم‌چنین رابطه زیر بیان‌گر انحنای شکل مودی بر اساس مودشکل‌ها می‌باشد [۵۴]:

$$v'' = \frac{(v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}))}{h^2} \quad (۶۹-۳)$$

در رابطه‌ی فوق پارامترهای v'' ، v ، h ، به ترتیب بیان‌گر میزان انحنای شکل مود، جرم شکل مودی و طول المانی که بین دو گره i و $i + 1$ قرار گرفته است، می‌باشد.

به طور کلی، رویداد آسیب در سازه منجر به کاهش سختی می‌شود و در پی آن انحنای افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان از این ویژگی برای شناسایی محل آسیب‌دیده در سازه‌ها استفاده کرد.

فصل چهارم:

روش جداسازی سیگنال‌های ناپیدا (BSS)

۴-۱- تکنیک جداسازی سیگنال‌های ناپیدا (BSS)

جداسازی سیگنال‌های ناپیدا (BSS) عبارت است از بازیابی سیگنال‌های مشاهده نشده یا همان منابع از روی ترکیباتی از آن‌ها که مشاهده شده‌اند. معمولاً مشاهدات از طریق خروجی مجموعه‌ای از حس‌گرها، که هر یک ترکیبات مختلفی از سیگنال‌های منبع را دریافت کرده‌اند، بدست می‌آیند. صفت ناپیدا بر این حقیقت تأکید دارد که:

۱. سیگنال‌های منبع مشاهده نمی‌شوند.

۲. هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره نحوه ترکیب سیگنال‌ها وجود ندارد.

در واقع در مواردی که هیچ‌گونه اطلاعات اولیه‌ای درباره نحوه انتقال سیگنال‌ها از منبع به حس‌گرها موجود نیست، استفاده از این روش اجتناب‌ناپذیر است. نبود اطلاعات قبلی درباره نحوه ترکیب، با فرض استقلال آماری سیگنال‌های منبع، جبران می‌شود. اگرچه این فرضیه به لحاظ آماری یک فرض قوی محسوب می‌شود ولی اغلب به لحاظ فیزیکی قابل پذیرش است. بنابراین از آنچه تحت عنوان ناپیدایی روش یاد شد نباید برداشت منفی کرد؛ چرا که ضعف اطلاعات قبلی دقیقاً همان نقطه‌ی قوت مدل BSS است [۵۵]. تکنیک‌های جداسازی سیگنال‌های ناپیدا، اولین بار در اوایل دهه‌ی ۸۰ میلادی برای پردازش سیگنال در زمینه‌ی مدل‌سازی شبکه عصبی مطرح شد. در دو دهه‌ی اخیر مطالعات گسترده‌ای روی این مقوله شکل گرفته است و زمینه‌ی کاربرد آن را در زیرشاخه‌های مختلف علم فراهم کرده است.

هدف تکنیک BSS را می‌توان به زبان ساده با مثال معروف پارتی کوکتل تشریح کرد [۵۶]. فرض می‌شود در اتاقی چندین نفر به طور هم‌زمان در حال صحبت هستند و در نقاط مختلف اتاق به تعداد افراد در حال صحبت، میکروفن‌هایی تعبیه شده است که سیگنال‌های صوتی موجود را ضبط می‌کند. از آن‌جا که سیگنال‌های ضبط شده توسط هر میکروفن، ترکیبی از سیگنال‌های صوتی ایجاد

شده توسط افراد مختلف است، بنابراین کاری که BSS انجام می‌دهد، جدا کردن سیگنال‌های صوتی اولیه از روی سیگنال‌های ترکیبی است.

یک ویژگی جالب روش BSS این است که نیازی به اطلاعات دقیق در مورد تحریک‌های اعمال شده (ورودی‌ها) ندارد و تنها با استفاده از بازتاب‌های اندازه‌گیری شده عمل می‌کند؛ به عبارت دیگر، روشی خروجی-محور است. این ویژگی، برای آنالیز مودال پل‌ها بسیار کارآمد است؛ زیرا در عمل، اندازه‌گیری دقیق همه‌ی محرک‌ها (ارتعاشات ناشی از باد، ترافیک، زلزله و غیره) امکان‌پذیر نمی‌باشد [۵۷].

فرض اساسی در روش‌های BSS این است که سیگنال‌های منابع به لحاظ آماری، مستقل از یکدیگرند. دو متغیر تصادفی را مستقل از هم گویند، اگر اطلاع از مقدار یکی از آن‌ها هیچ‌گونه اطلاعات اضافی در مورد متغیر دیگر ندهد؛ یا به زبان ریاضی تابع چگالی مشترک دو متغیر مستقل $P_{xy}(x, y)$ برابر با حاصل ضرب چگالی‌های مرزی آن دو باشد.

$$P_{xy}(x, y) = P(x).P(y) \quad (1-4)$$

در ساده‌ترین مدل BSS فرض می‌شود تعداد n منبع $\{S_1(t), \dots, S_n(t)\}$ و به همان تعداد سیگنال‌های ترکیبی مشاهده شده $\{X_1(t), \dots, X_n(t)\}$ وجود دارد. مدل عمومی BSS به زبان ریاضی بر روی ترکیبات استاتیک و خطی به صورت زیر می‌باشد:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} s_j(t) \quad (2-4)$$

یا:

$$X(t) = As(t) \quad (3-4)$$

ماتریس A با مؤلفه‌های مجهول a_{ij} ، تحت عنوان ماتریس ترکیب شناخته می‌شود. در اغلب موارد داده‌ها با نویز همراه هستند، در این صورت مدل عمومی BSS به فرم زیر خواهد بود:

$$X(t) = As(t) + n(t) \quad (4-4)$$

پارامتر n معرف نویز موجود در داده‌ها است. لازم به ذکر است با توجه به عمومیت تکنیک‌های BSS، این تکنیک‌ها محدود به متغیرهای تابع زمان نیستند؛ اگرچه در این بحث همواره متغیرها تابع زمان خواهند بود.

روش‌های متعددی برای جداسازی کور سیگنال‌ها موجود است. تفاوت عمده‌ی این روش‌ها از یک طرف در توابع هدف نشان‌دهنده‌ی استقلال منابع و از طرف دیگر در الگوریتم بهینه‌سازی تابع هدف موردنظر، می‌باشد. دو الگوریتم اساسی برای روش جداسازی سیگنال‌های ناپیدا عبارتند از:

(۱) تحلیل مؤلفه‌های مستقل^۱ (ICA)؛

(۲) شناسایی کور با استفاده از آمار مرتبه دوم^۲ (SOBI).

در الگوریتم ICA از مفاهیم آماری چون کورتوزیز و نکانتروپی به عنوان تابع هدف استفاده می‌شود. برای بهینه‌سازی این توابع نیز می‌توان از روش‌های گرادیان محور یا الگوریتم‌های نقطه ثابت استفاده کرد.

در الگوریتم SOBI، ساختار زمانی داده‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد و با استفاده از آمار مرتبه دوم، عملیات جداسازی سیگنال‌ها انجام می‌شود. SOBI از ماتریس کواریانس تأخیری داده‌ها، به عنوان تابع هدف استفاده می‌کند و با الگوریتم گرادیان محور، آن را بهینه می‌کند. از آن جا که SOBI

¹ -Independent Component Analysis (ICA)

² -Second-Order Blind Identification (SOBI)

به ساختار زمانی داده‌ها توجه دارد، بنابراین نیازی به فرض غیر گاوسی بودن توزیع آماری مؤلفه‌های مستقل ندارد.

۴-۱-۱- تحلیل مؤلفه‌های مستقل (ICA)

در تحلیل مؤلفه‌های مستقل برای جداسازی فرض می‌شود که سیگنال‌های منبع (همان مؤلفه‌های مستقل)، غیر گاوسی هستند و یا حداکثر غیر گاوسی بودن را دارا می‌باشند [۵۶]. بنابراین این روش برای حالتی که منبع یا منابع دارای توزیع آماری گاوسی باشند، با شکست مواجه می‌شود. حداکثر غیر گاوسی بودن سیگنال‌های منبع بر اساس یک اصل آماری تحت عنوان اصل حد مرکزی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

«تحت شرایط خاص، توزیع آماری حاصل جمع یا ترکیب خطی چند متغیر تصادفی مستقل، نسبت به هر یک از آن‌ها به طور مجزا، به توزیع گاوسی نزدیک‌تر است.»

با توجه به اصل بیان‌شده، برای یافتن مؤلفه‌های مستقل باید مؤلفه‌هایی یافت شوند که حداکثر غیر گاوسی بودن را دارا باشند که برای این منظور می‌توان توابع هدف متفاوتی مانند کورتوزیز و نگانتروپی را تعریف کرد.

۴-۱-۱-۱ کورتوزیز

یکی از ساده‌ترین راه‌کارها برای جداسازی کور منابع، استفاده از کورتوزیز است. کورتوزیز یک توزیع گاوسی صفر است که برای توزیع‌های غیر گاوسی، مقدار غیر صفر دارد و برای متغیر تصادفی y به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$kurt(y) = E\{y^4\} - 3(E\{y^2\})^2 \quad (۵-۴)$$

در رابطه‌ی بالا $E\{\cdot\}$ ، معرف امید ریاضی عبارت داخل کروشه است. برای راحتی می‌توان

واریانس را واحد در نظر گرفت؛ یعنی $E\{y^2\} = 1$. کورتوزیز برای متغیرهای تصادفی فوق گاوسی و زیر گاوسی به ترتیب، مقادیر مثبت و منفی دارد. متأسفانه کورتوزیز معیار مناسبی برای سنجش میزان غیر گاوسی بودن نیست، زیرا به شدت به داده‌های پرت^۱ حساس است و همچنین برآورد آن بار محاسباتی زیادی دارد [۵۷].

۴-۱-۱-۲- نگانتروپی

با توجه به علم آمار، هرچه متغیری تصادفی تر (بی ساختارتر و غیر قابل پیش بینی تر) باشد، آنترپی بیش تری دارد. یک نتیجه‌ی اساسی از تئوری اطلاعات بیان گر این است که متغیر گاوسی، بزرگ‌ترین آنترپی را در میان تمام متغیرهای تصادفی با واریانس واحد، دارد. با توجه به توضیحات بیان شده، برای سنجش میزان غیر گاوسی بودن می‌توان از تعریف نگانتروپی به صورت زیر استفاده کرد:

$$J(y) = H(y_{gauss}) - H(y) \quad (۴-۶)$$

که در آن J نگانتروپی و y_{gauss} یک بردار تصادفی با ماتریس همبستگی برابر با بردار y است؛ تابع H نیز معرف آنترپی دیفرانسیل بردار مورد نظر است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H(y) = -\int p_y(\zeta) \log p_y(\zeta) d\zeta \quad (۴-۷)$$

که در آن y یک بردار تصادفی و $p_y(\zeta)$ چگالی احتمال بردار y است. نگانتروپی پارامتری نامنفی است و تنها در حالتی مقدار آن صفر است که y توزیع گاوسی داشته باشد. اگر برای تقریب نگانتروپی از بسط چندجمله‌ای چگالی استفاده شود، در اغلب موارد لازم است از کورتوزیز استفاده شود که همانند قسمت قبل است، اما اگر از گشتاورهای غیر چندجمله‌ای استفاده شود، نگانتروپی با

^۱- Outliers

محاسبه‌ی امید ریاضی $E\{G^i(y)\}$ تقریب زده می‌شود. در حالت خاصی که از دو تابع غیرمربعی G^1 (فرد) و G^2 (زوج) استفاده شود، تقریب زیر بدست می‌آید:

$$J(y) \approx k_1 \left(E\{G^1(y)\} \right)^2 + k_2 \left(E\{G^2(y)\} \right) - E\{G^2(v)\} \quad (۸-۴)$$

که در آن k_1 و k_2 ثابت‌های مثبت و v یک متغیر گاوسی با میانگین صفر و واریانس واحد است. حتی در مواردی که تقریب فوق خیلی دقیق نباشد، می‌توان از رابطه‌ی (۸-۴) برای سنجش میزان غیرگاوسی بودن استفاده کرد زیرا مقدار بدست آمده از آن همواره نامنفی است و برای توزیع گاوسی صفر می‌شود. در حالتی که تنها از یک تابع غیرمربعی استفاده شود، تقریب نگانتروپی به صورت زیر خواهد بود:

$$J(y) \propto \left[E\{G(y)\} - E\{G(v)\} \right]^2 \quad (۹-۴)$$

در چنین موردی، انتخاب G به صورت زیر مناسب است:

$$\begin{cases} G^1(y) = \frac{1}{a_1} \log(\cosh(a_1 y)) \\ G^2(y) = -\exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) \end{cases} \quad (۱۰-۴)$$

که در آن a_1 ثابتی است که مقدارش بین ۱ و ۲ انتخاب می‌شود (اغلب برابر یک) [۵۶].

۴-۱-۲- شناسایی کور با استفاده از آمار مرتبه‌ی دوم (SOBI)

در اغلب روش‌های جداسازی که مبتنی بر الگوریتم ICA هستند، فرض می‌شود که متغیرهای تصادفی منابع، دارای توزیع‌های آماری یکسان هستند؛ همین امر سبب می‌شود که ترتیب نمونه‌برداری مهم نباشد و با معکوس کردن سیگنال‌های ترکیبی (از آخر به اول) نیز تغییری در روش برآورد یا دقت مدل ایجاد نشود. اما چنان‌چه ساختار زمانی سیگنال‌ها مورد توجه قرار گیرد، مسئله

متفاوت خواهد بود. هدف SOBI استفاده از ساختار زمانی سیگنال‌ها است. بنابراین این الگوریتم جایگزین مناسبی برای ICA، به ویژه در مواردی که منابع دارای محتوای فرکانسی متفاوت هستند، به حساب می‌آید.

الگوریتم SOBI از آمار مرتبه‌ی دوم یا به عبارت دقیق‌تر از ماتریس‌های کواریانس تأخیری استفاده می‌کند. ماتریس کواریانس تأخیری C_τ^x به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_\tau^x = E \{x(t+\tau)x^*(t)\} \quad (11-4)$$

که در آن بالانویس * به معنی مزدوج ترانهاد^۱ بردار مورد نظر است. از آن‌جا که SOBI بر مبنای قطری‌سازی ماتریس‌های کواریانس تأخیری می‌باشد، از نظر بار محاسباتی نسبت به ICA به مراتب سبک‌تر است. علاوه بر این با لحاظ کردن ساختار زمانی داده‌ها، نیازی به فرض غیر گاوسی بودن توزیع آماری مؤلفه‌های مستقل نیست. فرض اساسی در روش SOBI این است که منابع دارای اتوکواریانس^۲های غیر صفر و متفاوت با یکدیگر باشند [۵۸].

چنان‌چه چند سیگنال $z(t)$ دارای استقلال آماری باشند، تمام کواریانس‌های تأخیری آن‌ها به ازای مقادیر مختلف τ ، برابر صفر خواهد بود. بنابراین مسئله‌ی SOBI شامل پیدا کردن ماتریس تجزیه‌ی B است که چنان‌چه داده‌های مشاهده شده‌ی $x(t)$ اعمال شوند، همه‌ی کواریانس‌های تأخیری سیگنال‌های حاصل، صفر شوند؛ یعنی:

$$E \{z_i(t+\tau)z_j(t)\} = 0 \quad (12-4)$$

در رابطه‌ی (۱۲-۴)، چنان‌چه منابع، ایستا و دوه‌دو ناهمبسته باشند و طوری مقیاس شوند که واریانس آن‌ها برابر واحد شود، کواریانس تأخیری سیگنال‌های منبع به صورت زیر تعریف خواهد شد:

¹ Conjugate Transpose

² Auto-Covariance

$$C_0^s = E \{s(t)s^*(t)\} = I \quad (13-4)$$

بنابراین ماتریس کواریانس ترکیبات مشاهده شده برابر است با:

$$C_0^x = E \{x(t)x^*(t)\} = AC_0^sA^H + E \{n(t)n^*(t)\} = AA^H + \sigma_{noise}^2 I \quad (14-4)$$

که در آن، بالانویس H به معنی ترانپوز شده می باشد؛ همچنین فرض شده است که نویز $n(t)$ ایستا می باشد و از نظر زمان و مکان یک فرآیند تصادفی سفید و مستقل از سیگنال های منبع است. بنابراین الگوریتم SOBI شامل دو مرحله ی اساسی است:

۱. عملیات پیش پردازش شامل سفیدسازی^۱ داده ها؛

۲. برآورد ماتریس ترکیب A و سپس تعیین منابع $S(t)$.

۴-۱-۲-۱- سفیدسازی

به طور کلی سفیدسازی برای تمام الگوهای جداسازی منابع توصیه می شود، زیرا تعداد پارامترهای آزاد را کاهش داده و عملکرد روش را به طور قابل ملاحظه ای بهبود می بخشد. سفیدبودن یک ویژگی قوی تر نسبت به ناهمبستگی است. بردار تصادفی صفر میانگین $Z = (z_1, \dots, z_n)^T$ را سفید گویند اگر المان های آن نسبت به یکدیگر ناهمبسته بوده و دارای واریانس واحد باشند. یعنی:

$$E \{z_i z_j\} = \delta_{ij}$$

به عنوان نمونه می توان به نویز سفید اشاره کرد. عبارت سفید از این حیقت نشأت می گیرد که طیف توان نویز در همه فرکانس ها ثابت است، تا حدی شبیه طیف نور سفید که همه رنگ ها را در خود دارد. از آنجا که سفیدسازی اساساً همان ناهمبسته سازی^۲ به همراه مقیاس کردن است، تکنیک

¹ -Whitening

² - Decorrolation

تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ در این مورد قابل استفاده خواهد بود. در واقع صورت مسئله بدین قرار است: برای بردار تصادفی داده x با n مؤلفه، تبدیل خطی V را طوری پیدا کنید که بردار تبدیل‌یافته z ($z = Vx$)، سفید باشد.

برای این کار ابتدا باید ماتریس کوواریانس بردار تصادفی x و سپس مقادیر ویژه و بردارهای ویژه آن را محاسبه کرد. در این صورت یک تبدیل سفیدکننده به صورت زیر خواهد بود:

$$V = D^{-1/2} E^T \quad (۱۵-۴)$$

که در آن $D = \text{diag}(d_1, \dots, d_n)$ یک ماتریس قطری شامل مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس C^x و $E = [e_1, \dots, e_n]$ ماتریسی است که ستون‌های آن بردارهای ویژه نرمال شده C^x هستند. شایان ذکر است که ماتریس تبدیل فوق مادمی که مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس مثبت باشند، همواره موجود است (در عمل این شرایط همواره برقرار است).

باید توجه داشت که تبدیل خطی سفیدکننده V یک ماتریس منحصر به فرد نیست. به عبارت دیگر هر ماتریس LV ، که در آن L یک ماتریس متعامد است، نیز یک تبدیل سفیدساز خواهد بود. یک مورد مهم از تبدیلات سفیدساز، ماتریس $ED^{-1/2}E^T$ است که جذر معکوس ماتریس کوواریانس C^x نامیده شده و با $(C^x)^{-1/2}$ نشان داده می‌شود [۵۵].

۴-۱-۲-۲- برآورد ماتریس ترکیب

در این گام هدف بدست‌آوردن ماتریس متعامد نرمال (مختلط) U و به دنبال آن محاسبه ماتریس A است به طوریکه ماتریس کوواریانس تاخیری داده‌های سفیدشده به ازای مقادیر غیرصفر τ نیز صفر شود:

^۱ - Principal Component Analysis (PCA)

$$C_{\tau}^{x_w} = UC_{\tau}^s U^H \quad (۱۶-۴)$$

از آنجایی که C_{τ}^s یک ماتریس قطری است (به دلیل استقلال آماری منابع) و U نیز یک ماتریس متعامد نرمال است، می توان نتیجه گیری کرد که ماتریس U از تجزیه ی مقدار ویژه ماتریس کوواریانس تاخیری داده های سفیدسازی شده $C_{\tau}^{x_w}$ ، به دست می آید. مؤلفه های قطری ماتریس C_{τ}^s باید متفاوت باشند، بدین منظور باید مقادیر ویژه ماتریس $C_{\tau}^{x_w}$ و بردارهای ویژه متناظر با آنها متفاوت و یکتا باشند. بنابراین مقدار تاخیر زمانی τ باید به دقت انتخاب شود. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان داده اند که چنانچه بجای یک تاخیر زمانی از چند تاخیر زمانی استفاده شود و ماتریس کوواریانس متناظر با تک تک آنها به طور همزمان قطری شوند، نتایج بهتری حاصل می شود [۵۸].

فصل پنجم:

مثال‌های عددی

۵-۱- پیش‌گفتار

در این فصل جهت بررسی توانمندی روش جستجوی کور منابع در تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌ی پل، چند مثال عددی مطرح شده است. در هر یک از این مثال‌ها، یک بار نتایج با استفاده از الگوریتم‌های روش BSS بدست می‌آید و بار دیگر از طریق روش دقیق اجزای محدود حل می‌گردد. در نهایت برای مقایسه و صحت‌سنجی از معیار اطمینان مودی استفاده می‌شود.

در این فصل، ۵ مثال به شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

در مثال ۱، استخراج اشکال مودی یک پل مستقیم با استفاده از روش پایش مستقیم انجام می‌گیرد. پل به صورت تیر اوپلر_برنولی و خودرو به صورت سیستم جرم_فنر تک محوره مدل‌سازی شده است.

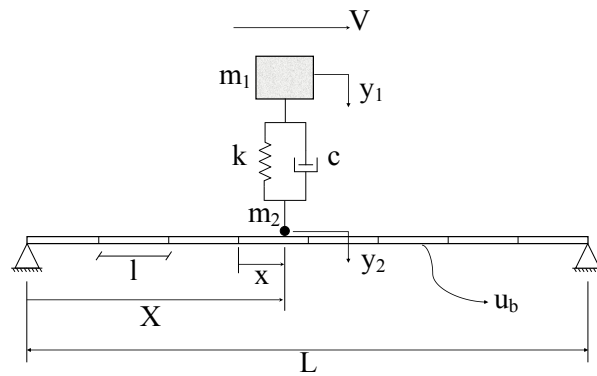
در مثال ۲، استخراج اشکال مودی یک پل خمیده با استفاده از روش پایش مستقیم انجام می‌گیرد. پل به صورت تیر تیموشنکو و خودرو به صورت سیستم جرم_فنر تک محوره مدل‌سازی شده است.

در مثال ۳، شناسایی محل آسیب پل مستقیم با استفاده از تغییرات انحنای شکل مودی انجام می‌شود. در این مثال از شکل‌مدهای بدست‌آمده از مثال ۱، استفاده شده است.

در مثال ۴، شناسایی محل آسیب پل خمیده با استفاده از تغییرات انحنای شکل مودی انجام می‌شود. در این مثال از شکل‌مدهای بدست‌آمده از مثال ۲، استفاده شده است.

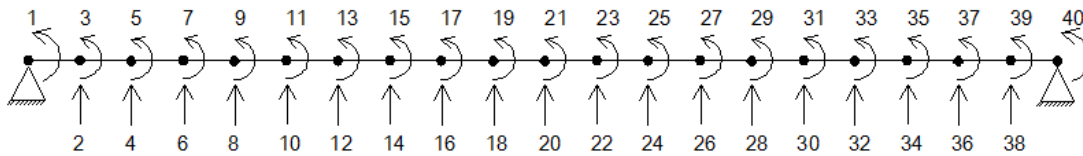
۵-۲- مثال ۱

مدل‌سازی پل و خودروی عبوری در شکل (۵-۱) مشاهده می‌شود:



شکل ۵-۱: تیر مدل‌سازی شده در معرض حرکت سیستم جرم-فنر

ابتدا المان‌بندی تیر به روش اجزای محدود صورت می‌گیرد. در این جا تیر به ۲۰ المان تقسیم می‌شود. هر المان دارای دو گره در ابتدا و انتهایش است و همان‌طور که در شکل (۵-۲) مشاهده می‌شود، به ازای هر گره دو درجه‌ی آزادی، شامل: جابه‌جایی عمودی و دوران در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵-۲: درجات آزادی تیر مفصلی مدل‌سازی شده

جدول (۵-۱) مشخصات پل و خودروی تست عبوری که مدل‌سازی شده‌اند را نشان می‌دهد.

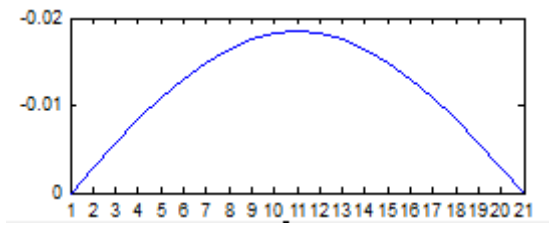
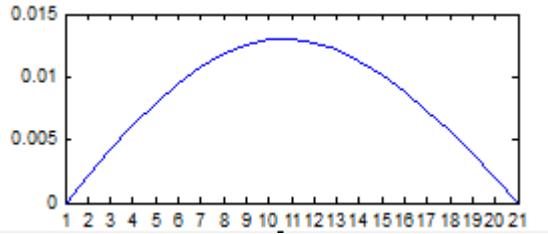
جدول ۵-۱: پارامترهای تیر و مجموعه‌ی جرم-فنر مدل‌سازی شده

| | | | |
|--------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|
| $M_v=1200 \text{ kg}$ | جرم بدنه خودرو | $L=25 \text{ m}$ | طول تیر |
| $m_w=0 \text{ kg}$ | جرم چرخ‌های خودرو | $EI=3.3e+9 \text{ N.m}^2$ | سختی خمشی تیر |
| $K_v=500e+3 \text{ N/m}$ | سختی | $m=4800 \text{ kg/m}$ | جرم بر واحد طول تیر |
| $C_v=0 \text{ N.s/m}$ | میرایی | $V=10 \text{ m/s}$ | سرعت خودرو |

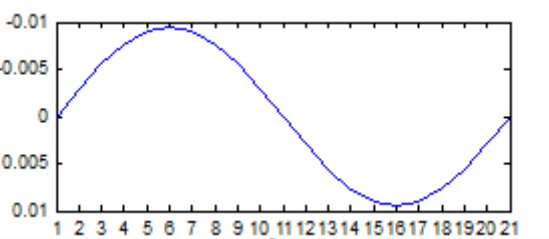
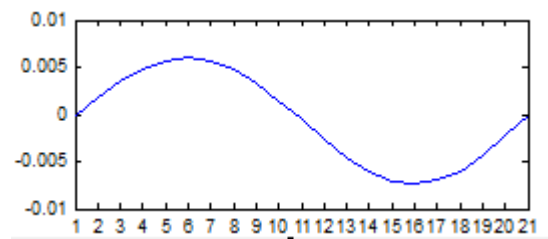
شبیه‌سازی در مدت زمان ۲.۵ ثانیه و به ازای گام‌های زمانی ۰.۰۰۲ ثانیه و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود. معادلات اندرکنش با استفاده از روش عددی نیومارک- β با شتاب خطی ثابت حل می‌گردد. پاسخ دینامیکی حاصل از شتاب عمودی به صورت یک سیگنال بدست آمده و به الگوریتم‌های SOBI و ICA داده می‌شود. خروجی موردنظر تحت عنوان شکل‌موهای سازه به صورت

زیر استخراج می‌شود:

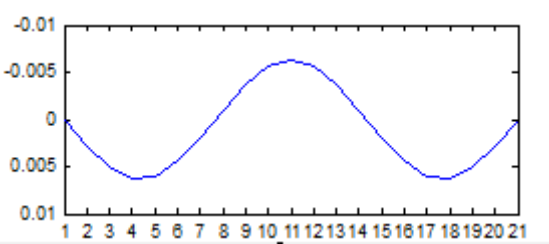
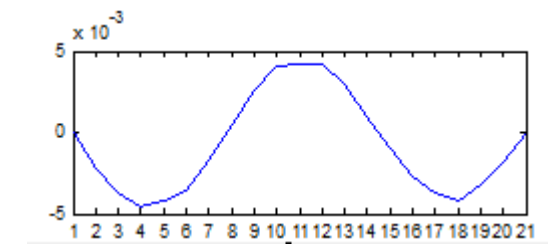
• نتایج حاصل از تکنیک BSS



مود اول



مود دوم



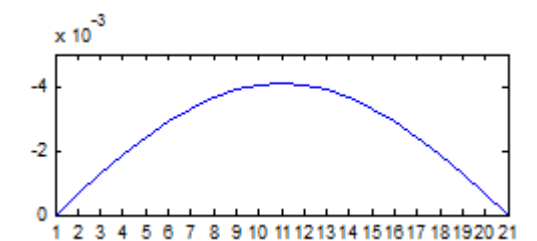
مود سوم

ب- الگوریتم ICA

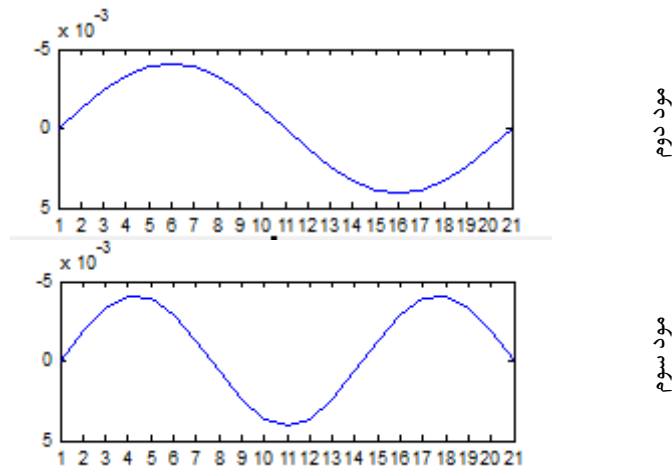
الف- الگوریتم SOBI

شکل ۵-۳: مود شکل‌های بدست آمده از الگوریتم‌های BSS

• نتایج حاصل از روش تحلیلی FEM



مود اول



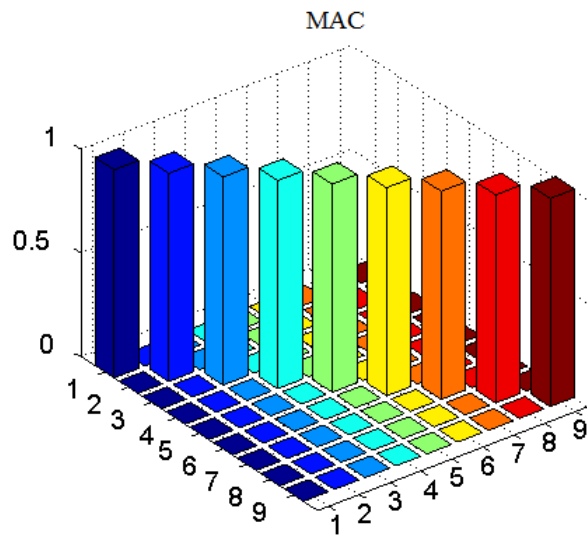
شکل ۵-۴: مود شکل‌های بدست آمده از روش FEM

همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج بدست آمده از دو رویکرد ICA و SOBI تطابق خیلی خوبی با اشکال مودی بدست آمده از FEM دارند. با این حال، برای بررسی همبستگی شکل‌های مودی از معیار اطمینان مودی^۱ طبق تعریف در رابطه‌ی (۵-۱)، استفاده شده است [۵۹].

$$MAC = \frac{|\Psi^T \phi|^2}{|(\Psi^T \Psi)(\phi^T \phi)|} \quad (۵-۱)$$

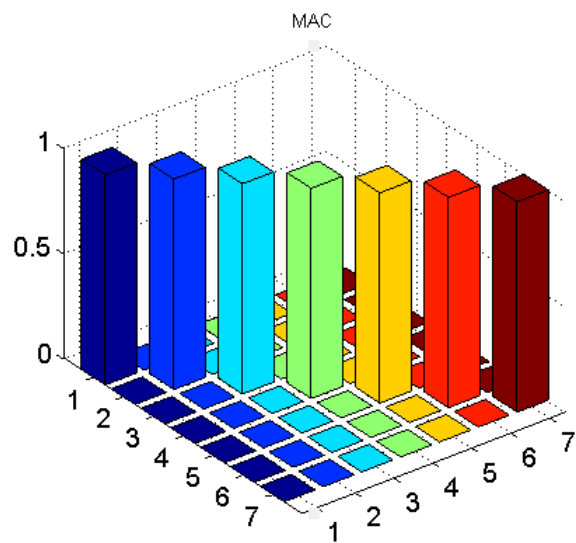
که در آن Ψ شکل مود به دست آمده از روش SOBI یا ICA است و ϕ شکل مود واقعی حاصل از روش المان محدود می‌باشد. معیار تضمین مودی (MAC)، بیان‌گر اندازه‌ی کسینوس زاویه بین بردارهای شکل مود است. اگر بردارهای شکل مود بر هم منطبق باشند، مقدار این شاخص برابر یک می‌شود. بنابراین مقدار MAC برای همه‌ی مودهای روش SOBI و روش اجزای محدود محاسبه شده و نمودار آن در شکل (۵-۵) ارائه شده است. به همین ترتیب در شکل (۵-۶) نیز مقدار MAC برای مود شکل‌های الگوریتم ICA و روش اجزای محدود محاسبه شده است.

^۱- Modal Assurance Criteria(MAC)



شکل ۵-۵: مقایسه اشکال مودی دو روش، SOBI و اجزای محدود با استفاده از شاخص MAC

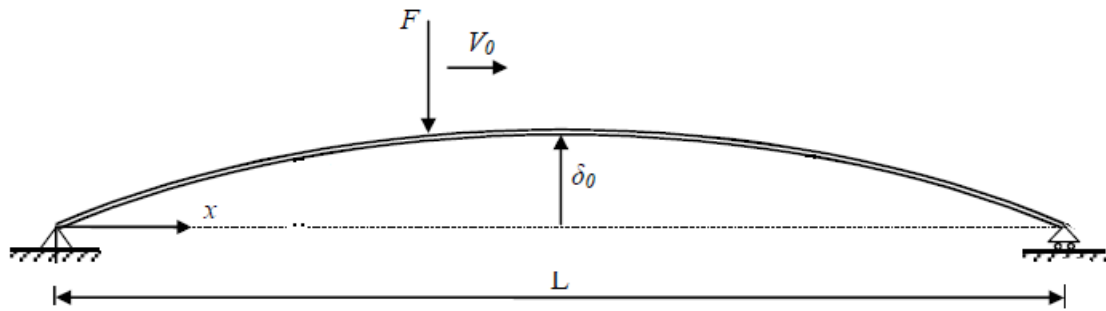
و همچنین:



شکل ۵-۶: مقایسه اشکال مودی دو روش، ICA و اجزای محدود با استفاده از شاخص MAC

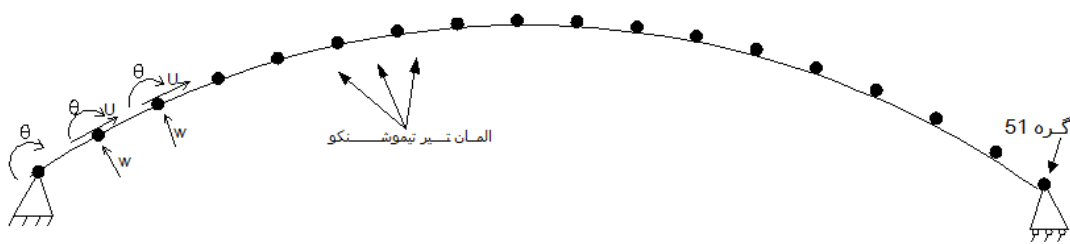
۵-۳-۲ مثال ۲

مدل سازی پل و خودروی عبوری در شکل (۵-۷) مشاهده می شود:



شکل ۵-۷: تیر خمیده در معرض حرکت نیروی متمرکز متحرک

در این جا نیز ابتدا المان بندی تیر به روش اجزای محدود صورت می گیرد. تیر به ۵۰ المان تقسیم می شود. هر المان دارای دو گره اصلی در ابتدا و انتهایش و دو گره میانی است، هر چهار گره به فواصل یکسان از هم قرار گرفته اند. همان طور که در شکل (۷-۵) مشاهده می شود، به ازای هر گره سه درجه ی آزادی، شامل: جابه جایی شعاعی، جابه جایی مماسی و دوران در نظر گرفته می شود.



شکل ۵-۸: درجات آزادی تیر خمیده مفصلی مدل سازی شده

جدول (۲-۵) مشخصات پل و خودروی تست عبوری که مدل سازی شده اند را نشان می دهد.

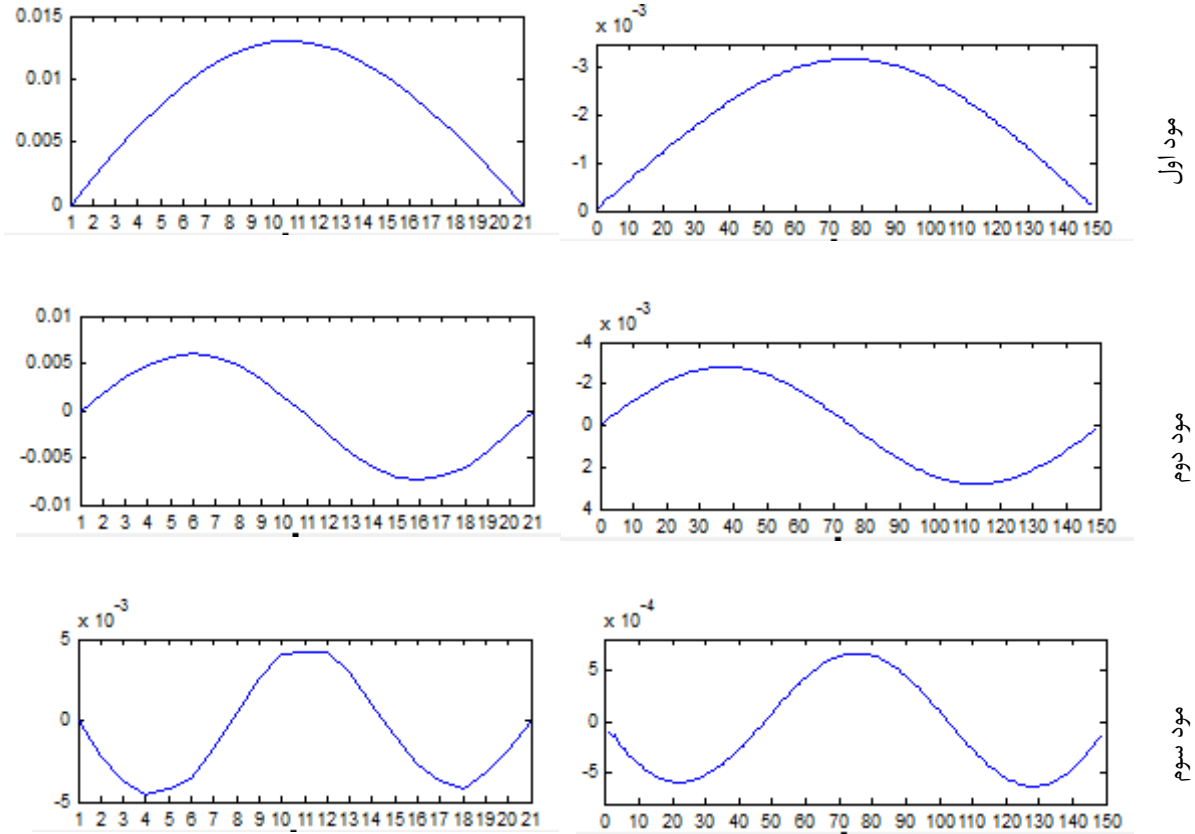
جدول ۲-۵: مشخصات تیر خمیده تحت اثر نیروی متمرکز متحرک

| | | | |
|----------------------------|-------------|---------------------|-----------------|
| $\rho=7200 \text{ kg/m}^3$ | چگالی تیر | $L=10 \text{ m}$ | طول تیر |
| $R=20 \text{ m}$ | شعاع تیر | $W=1.5 \text{ m}$ | عرض مقطع تیر |
| $\xi=0.05$ | نسبت میرایی | $h=0.8 \text{ m}$ | ارتفاع مقطع تیر |
| $f_w=50 \text{ KN}$ | مقدار نیرو | $V=10 \text{ m/s}$ | سرعت خودرو |
| - | | $E=120 \text{ Gpa}$ | مدول الاستیسیته |

شبیه سازی در مدت زمان ۲.۵ ثانیه و به ازای گام های زمانی ۰.۰۰۲ ثانیه و با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام می شود. پاسخ دینامیکی حاصل از شتاب جابه جایی شعاعی به صورت یک سیگنال بدست آمده و به الگوریتم های SOBI و ICA داده می شود. خروجی مورد نظر تحت عنوان شکل موهای

سازه به صورت زیر استخراج می‌شود:

• نتایج تکنیک BSS

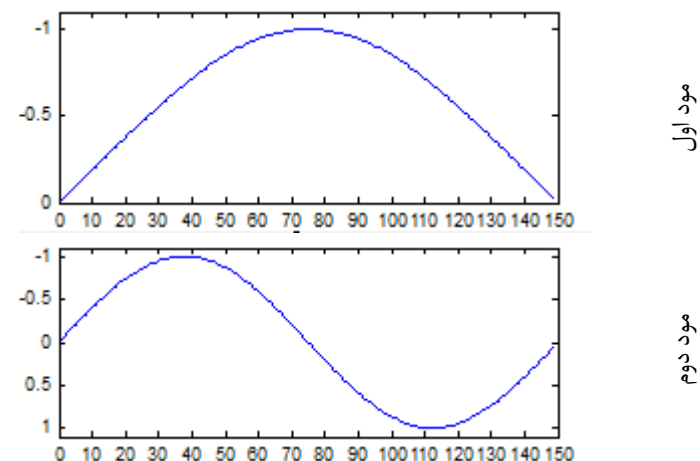


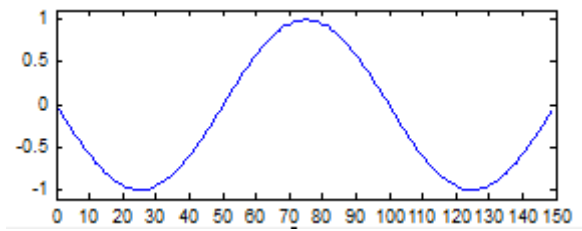
ب- الگوریتم ICA

الف- الگوریتم SOBI

شکل ۵-۹: مود شکل‌های بدست آمده از الگوریتم‌های BSS (تیر خمیده)

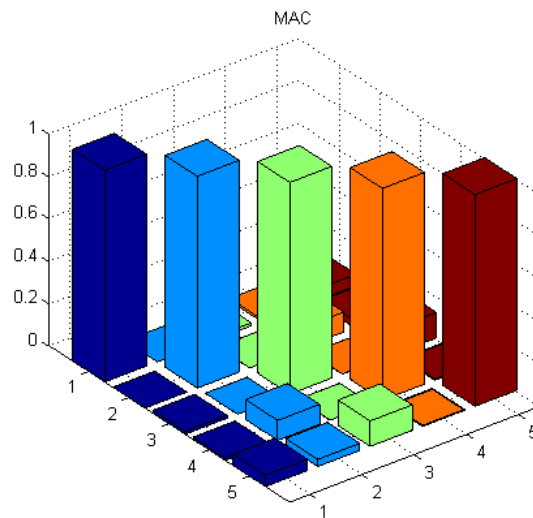
• نتایج حاصل از روش تحلیلی FEM





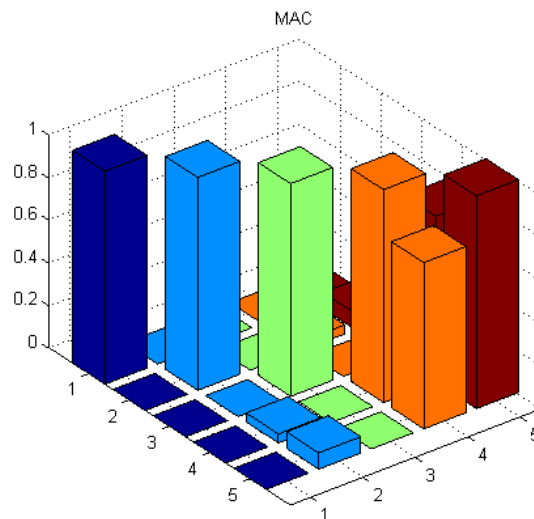
مود سوم

شکل ۵-۱۰: مود شکل‌های بدست آمده از FEM (تیر خمیده)



شکل ۵-۱۱: مقایسه اشکال مودی دو روش، SOBI و اجزای محدود با استفاده از شاخص MAC برای تیر خمیده

و هم‌چنین:

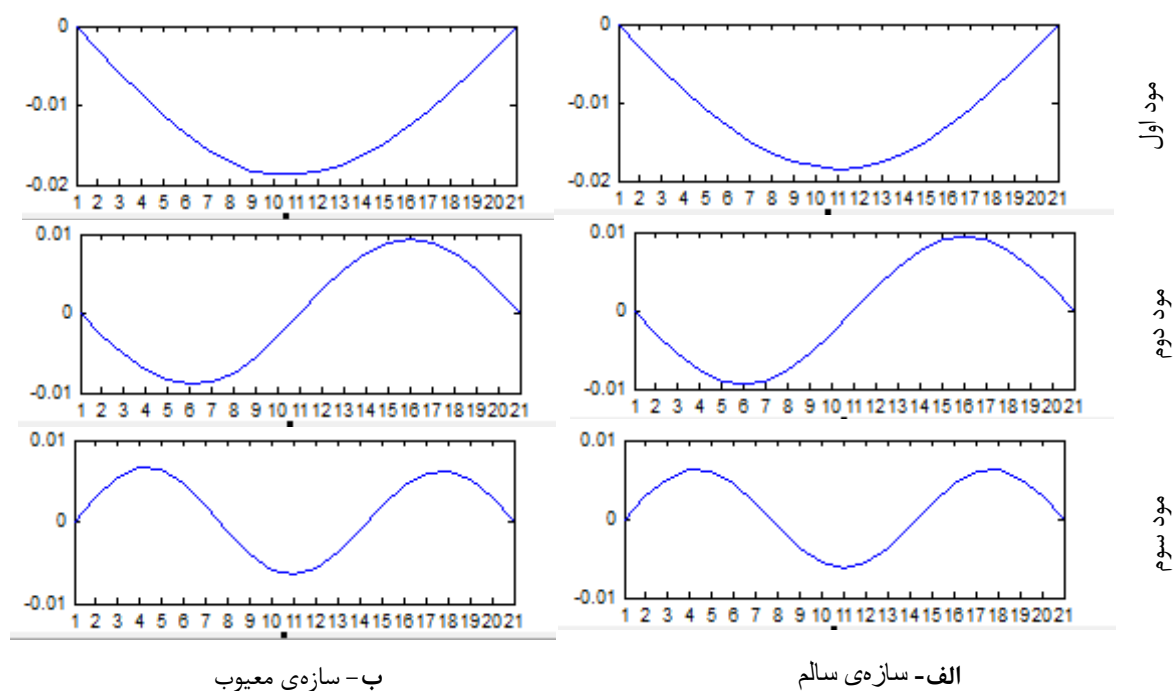


شکل ۵-۱۲: مقایسه اشکال مودی دو روش، ICA و اجزای محدود با استفاده از شاخص MAC برای تیر خمیده

۵-۴- مثال ۳

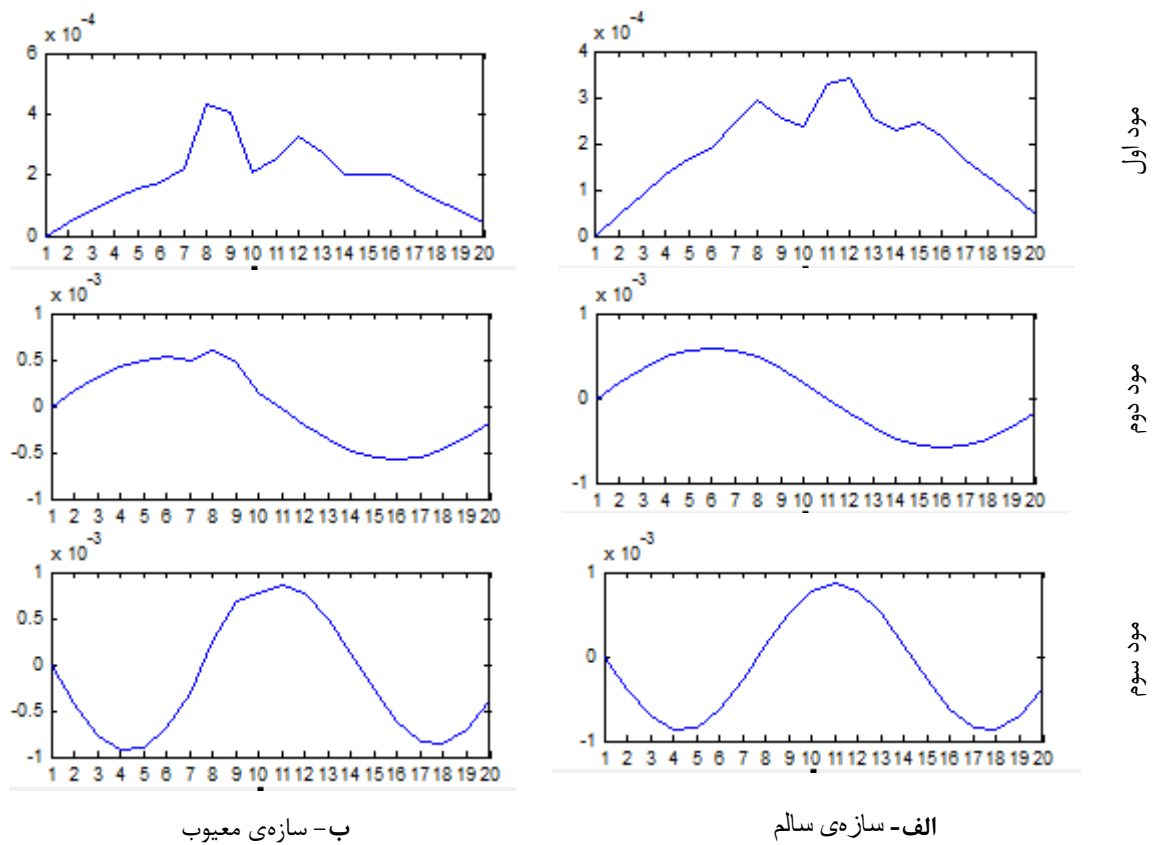
در این مثال، با استفاده از مودشکل‌های بدست آمده از الگوریتم SOBI برای تیر مستقیم مطرح‌شده در مثال ۱، شناسایی محل آسیب انجام می‌شود. برای این منظور ابتدا با استفاده از رابطه (۳-۶۹) نمودار انحنای شکل مودی، برای وضعیتی که همه‌ی المان‌ها سالم هستند یا به عبارت دیگر، همه‌ی المان‌ها دارای سختی خمشی یکسان هستند، ترسیم می‌شود. سپس برای ایجاد حالت معیوب، از میان ۲۰ المان تیر، المان ۸ انتخاب شده و سختی آن به میزان ۵۰٪ کاهش یافته است. برای این وضعیت نیز نمودار انحنای شکل مودی ترسیم می‌گردد. در نهایت نمودار تغییرات انحنای شکل مودی که از تفاضل انحنای سازه معیوب و سالم بدست می‌آید ترسیم شده و محل دقیق آسیب شناسایی می‌گردد.

• مود شکل‌ها



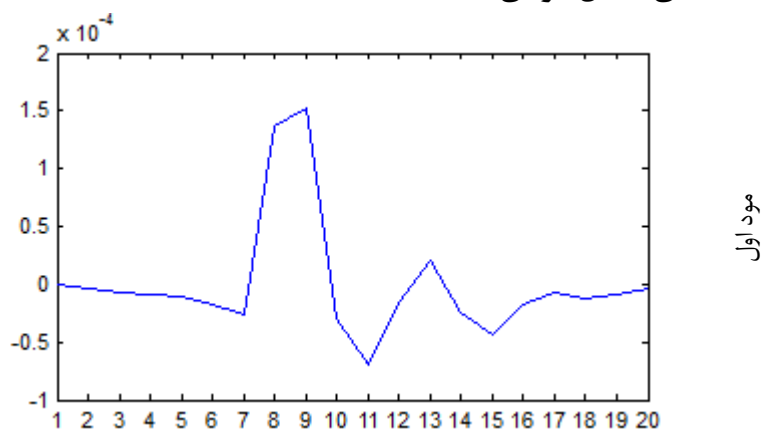
شکل ۵-۱۳: مود شکل‌های به دست آمده از الگوریتم SOBI

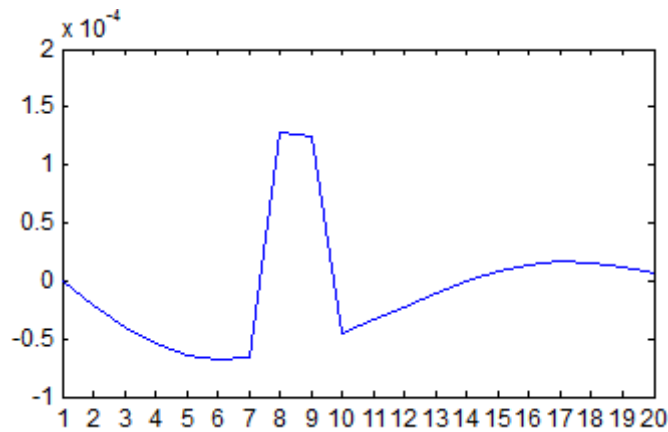
• انحنای شکل مودی



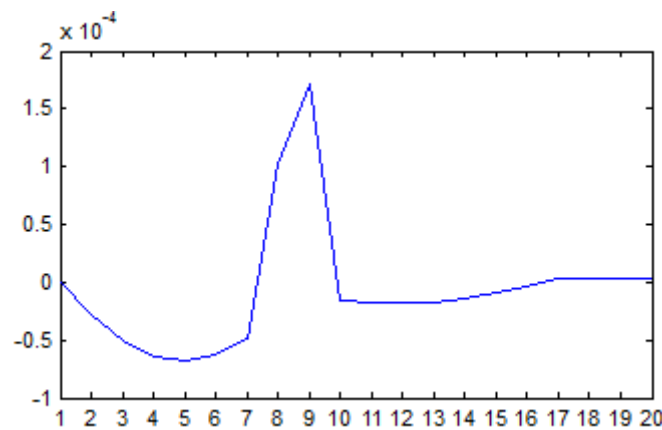
شکل ۵-۱۴: انحنای شکل مودی سازه

• تغییرات انحنای شکل مودی





مود دوم



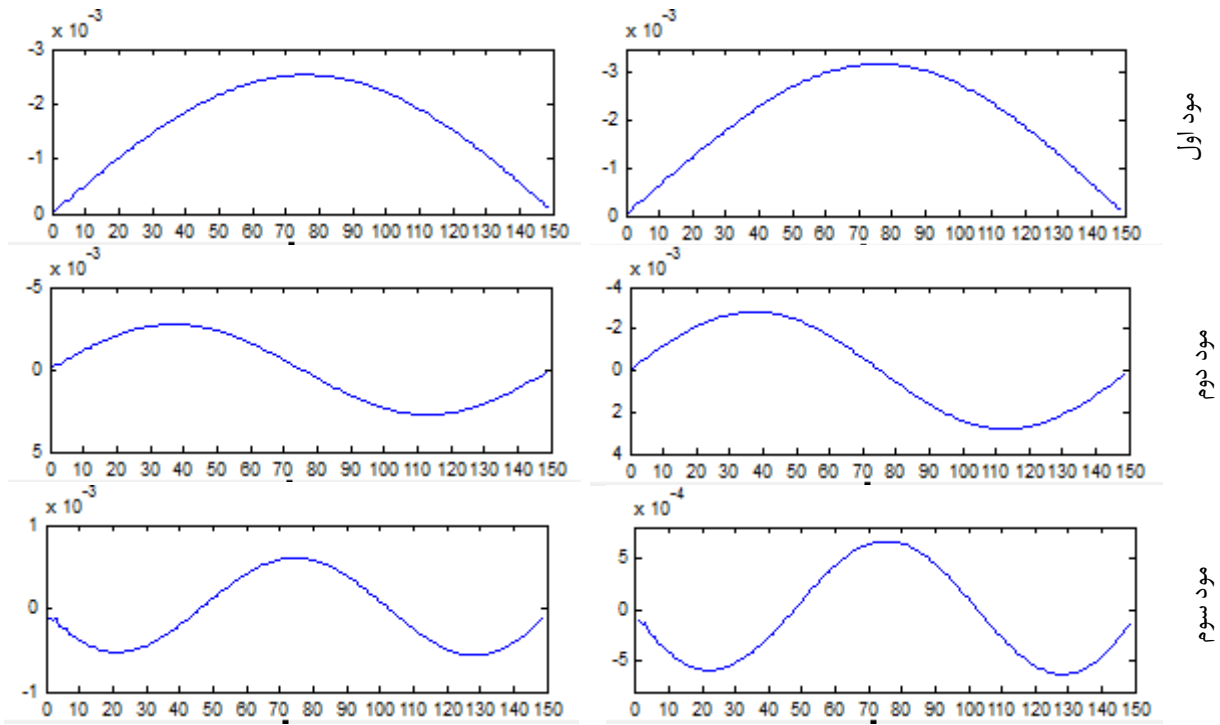
مود پنجم

شکل ۵-۱۵: تغییرات انحنای شکل مودی

۵-۵- مثال ۴

در این مثال، با استفاده از مودشکل‌های بدست آمده از الگوریتم SOBI برای تیر خمیده مطرح شده در مثال ۲، شناسایی محل آسیب انجام می‌شود. مراحل انجام شناسایی آسیب همانند توضیحاتی است که در مثال قبل ذکر شد. همان‌طور که در مثال ۲ آورده شده است، تیر خمیده شامل ۵۰ گره اصلی است که با در نظر گرفتن گره‌های میانی به طور کل دارای ۱۵۱ گره و ۱۵۰ المان می‌باشد. از میان همه‌ی المان‌ها، المان شماره‌ی ۱۰ و ۴۰ اصلی برای حالت معیوب انتخاب شده‌اند و سختی خمشی آن‌ها به میزان ۲۰٪ کاهش یافته است. المان ۱۰ ام در حالت کلی شامل المان‌های ۲۸، ۲۹ و ۳۰ می‌باشد. المان ۴۰ ام اصلی نیز شامل المان‌های ۱۱۸، ۱۱۹ و ۱۲۰ است. در زیر نمودارهای مربوط به انحنای شکل مودی و تغییرات انحنای شکل مودی برای شناسایی محل دقیق آسیب ترسیم می‌گردد.

• مود شکل‌ها

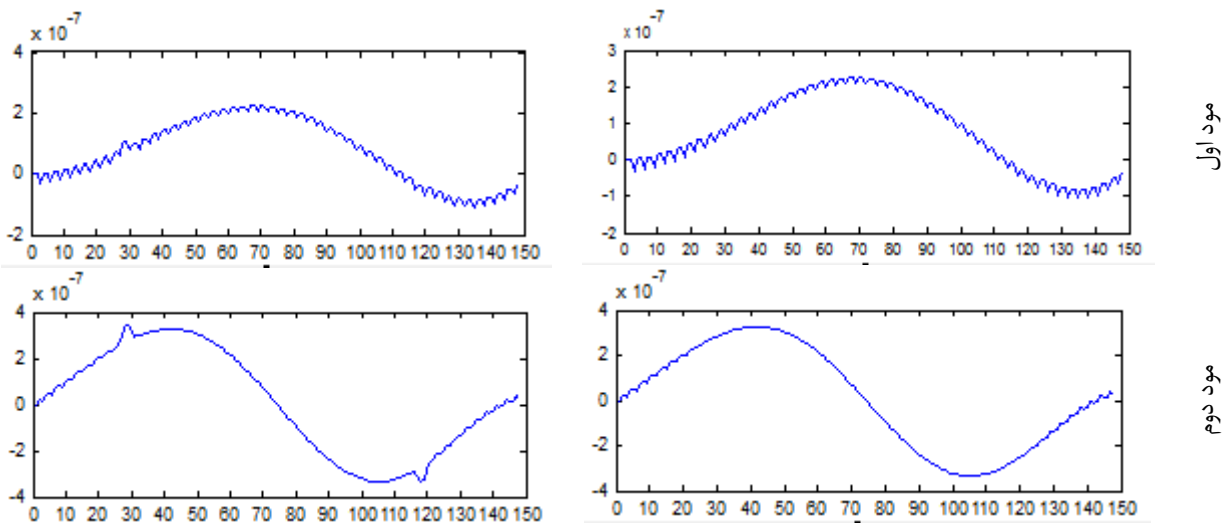


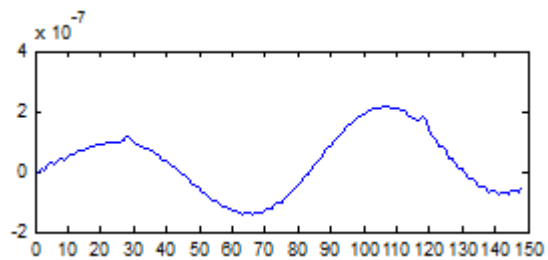
ب- سازه‌ی معیوب

الف- سازه‌ی سالم

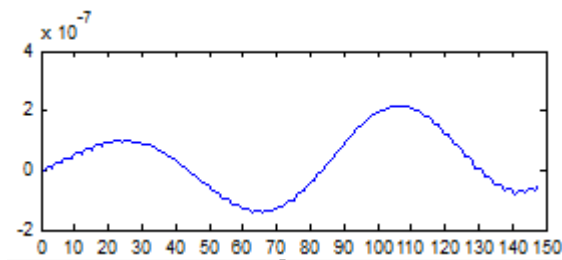
شکل ۵-۱۶: مود شکل‌های بدست آمده از الگوریتم SOBI

• انحنای شکل مودی





ب- تیر خمیده معیوب

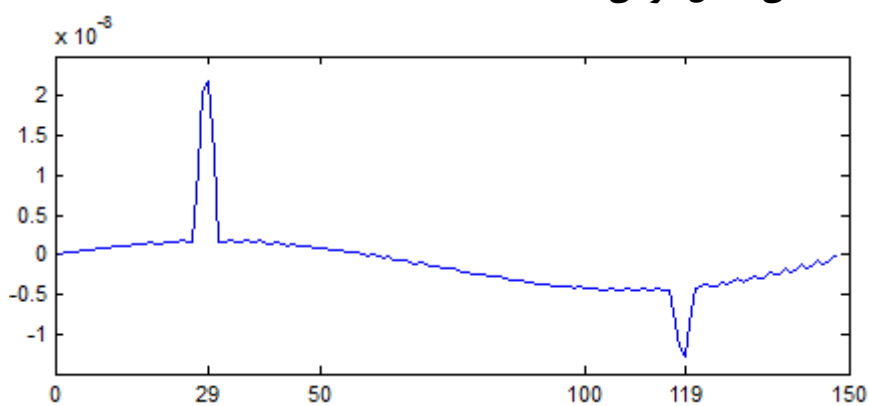


الف- تیر خمیده سالم

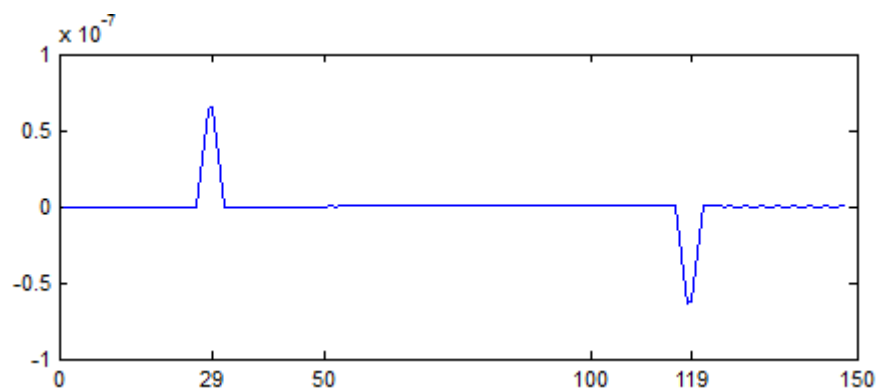
مود سوم

شکل ۵-۱۷: انحنای شکل مودی سازه

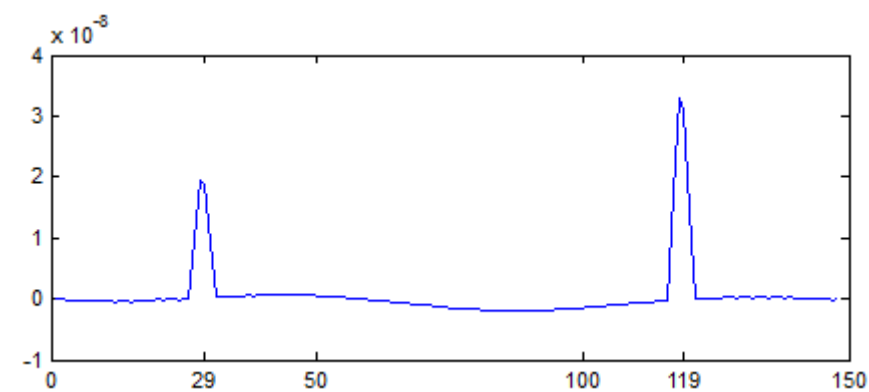
• تغییرات انحنای شکل مودی



مود اول



مود دوم



مود سوم

شکل ۵-۱۸: تغییرات انحنای شکل مودی

فصل ششم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- پایش سلامت سازه به روش مستقیم و غیرمستقیم قابل انجام است و در حالت تئوری مسأله می‌توان برای دست‌یابی به اندرکنش پل_خودرو از مدل‌سازی آن‌ها به صورت تیر و سیستم متحرک جرم_فنر استفاده نمود و به نتایج نسبتاً دقیقی دست یافت.
- در صورتیکه پل خمیده‌ای تحت عبور خودرو قرار گیرد، برای مدل‌سازی پل می‌توان آن را به صورت یک تیر تیموشنکو فرض نمود که تحت بار متحرکی قرار گرفته است و برای هر گره از المان تیر سه درجه آزادی جابه‌جایی شعاعی، مماسی و دوران در نظر گرفت سپس با حل معادلات اندرکنش به نتایج مورد نظر دست یافت.
- کاربرد تکنیک جداسازی سیگنال‌های ناپیدا در زمینه دینامیک سازه که به صورت چالشی برای مهندسين باقی مانده بود، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از الگوریتم‌های ICA و SOBI بیان‌گر آن است که این امکان وجود دارد و برای تعیین خصوصیات دینامیکی پل از جمله اشکال مودی آن، می‌توان از BSS استفاده نمود و به نتایج بسیار دقیقی دست یافت.
- با توجه به نتایج بدست آمده از نمودار مربوط به مودشکل‌های سازه در وضعیت سالم و معیوب می‌توان به این نتیجه رسید که در زمینه تشخیص محل خرابی، مودشکل مربوط به وضعیت معیوب و سالم تفاوتی با یک‌دیگر ندارند. بنابراین به تنهایی نمی‌توان از نمودار مودشکل سازه سالم و معیوب برای تشخیص محل خرابی استفاده نمود.
- با توجه به نمودار انحنای شکل مودی برای سازه سالم و معیوب و مقایسه‌ی آن‌ها با یک‌دیگر، مشاهده می‌شود که محل خرابی به صورت افزایش انحنا در نمودار مربوط به وضعیت معیوب سازه مشخص می‌گردد و این افزایش انحنا به معنای کاهش سختی المان قرار گرفته در آن محل است. برای واضح‌تر دیده شدن محل خرابی می‌توان به نمودار تغییرات انحنای شکل

مودی که از تفاضل انحنای سازه معیوب و سالم بدست آمده استفاده کرد. در این نمودار محل آسیب دیده کاملاً واضح و دقیق مشخص گردیده است.

۲-۶- پیشنهادات

- در پژوهش حاضر از اثرات میرایی برای مدل سازی پل و خودرو صرف نظر شده است که می توان در پژوهش های بعدی آن را نیز لحاظ نمود.
- خودرو با سرعت ثابت از روی پل عبور داده شده است که می توان اثر تغییرات سرعت را بر روی نتایج بدست آمده بررسی نمود.
- در استفاده از تکنیک BSS می توان نویز را نیز وارد کرد و نتایج را مورد بررسی قرار داد.
- اثر زبری سطح جاده را می توان در نظر گرفت و تاثیرش را در نتایج بررسی نمود.

- [1] F. Akgul, "A BMS development project with an integrated inspection program," in *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability*, New York, NY, USA, CRC Press, 2012, p. 2659–2665.
- [2] Fujino, Y; Siringoringo, D.M., "Bridge monitoring in Japan: the needs and strategies," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 7, no. 7-8, pp. 597-611, 2011.
- [3] Hui, L. and Jinping, O. (2011), "Structural Health Monitoring: From Sensing Technology Stepping to Health Diagnosis," *Procedia Engineering*, **14**, pp 753–760.
- [4] Poncelet, F., Kerschen, G., Golinval, J. C., Verhelst, D. (2007), "Output-only modal analysis using blind source separation techniques," *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**(23), pp 2335–2358.
- [5] Goldberg, D; Davis, S.L, *The Fix We're In For: The State*, 2013.
- [6] Znidaric, A; Pakrashi, V; O'Brien, E. J and O'Connor, A, "A review of road structure data in six European countries," *Proceedings of the ICE: Urban Design and Planning*, vol. 164, no. 4, pp. 225-232, 2011.
- [7] رسولی، ا.، عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، پایان‌نامه ارشد عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۰.
- [8] A. Muñoz, M. Blondet, U. Quintana, and H. Leon, "Earthquake resistant performance of Peruvian school buildings," in *Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering*, 2004.
- [9] Haung, C. and Nagarajaiah, S. (2014), "Experimental study on bridge structural health monitoring using blind source separation method: arch bridge," *Structural Monitoring and Maintenance*, **1**(1), pp 069–087.
- [10] Haung, C. and Nagarajaiah, S. (2014), "Experimental study on bridge structural health monitoring using blind source separation method: arch bridge," *Structural Monitoring and Maintenance*, **1**(1), pp 069–087.

- [11] Mufti, A.A., Tadros, G. and Jones, P.R. (1997), "Field assessment of fibre-optic bragg grating strain sensors in the confederation bridge", *Can. J. Civil Eng.*, **24**(6), 963-966.
- [12] Lynch, J.P., Law, K.H., Kiremidjian, A.S. and Carryer, E. (2004), "Design and performance validation of a wireless sensing unit for structural monitoring applications", *Struct. Eng. Mech.*, **17**(3), 1-16.
- [13] Spencer, B.F., Ruiz-Sandoval, M.E. and Kurata, N. (2004), "Smart sensing technology: opportunities and challenges", *Struct. Control Health Monit.*, **11**(4), 349-368.
- [14] Brincker, R., Zhang, L. and Andersen, P. (2001), "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition", *Smart Mater. Struct.*, **10**(3), 441.
- [15] Juang, J.N. and Pappa, R.S. (1985), "An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction", *J. Guid. Control Dynam.*, **8**(5), 620-627.
- [16] Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C. and Liu, H.H. (1998), "The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis", *P. Roy. Soc. London. Series A: Math. Phys. Eng. Sci.*, **454**(1971), 903-995.
- [17] T.Yoshimura, J.Hino, (1984) "Vibration Analysis of a Non-Linear Beam Subjected to Moving Loads By Using The Galerkin Method", *Journal of Sound and Vibration*, Volume 104, Issue 2, 22 January 1986, Pages 179-186.
- [18] Humar, J. L., Kashif, A. F., "Dynamic response analysis of slab-type bridges", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, pp. 48-62, 1995.
- [19] Marchesiello, S., Fasana, A., Garibaldi, L., Piombo, B. A. D., "Dynamics of multi-span continuous straight bridges subject to multi-degrees of freedom moving vehicle excitation", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 224, pp. 541-561, 1999.

[۲۰] خیراندیش، و.، بررسی ارتعاشات و تحلیل تنش پل انحنادار کامپوزیتی در اثر حرکت شتابدار خودرو بر روی آن، پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۹.

- [21] Zarfam, R., Khaloo, A. R., Nikkhoo, A., "On the response spectrum of Euler-Bernoulli beam with a moving mass and horizontal support excitation ", Journal of Mechanics Research Communication, Vol. 47, pp. 77-83, 2012.
- [22] A.D. Back, A.S. Weigend, A first application of independent component analysis to extracting structure from stock returns, International Journal of Neural Systems 8 (1997) 473–484.
- [23] G. Patanchon, J. Delabrouille, J.F. Cardoso, Source separation on astrophysical data sets from the WMAP satellite, in: Lecture Notes in Computer Science, vol. 3195, 2004, pp. 1221–1228.
- [24] T.P. Jung, S. Makeig, M.J. McKeown, A.J. Bell, T.W. Lee, T.J. Sejnowski, Imaging brain dynamics using independent component analysis, Proceedings of the IEEE 89 (2001) 1107–1122.
- [25] A. Hyvarinen, E. Oja, Independent component analysis: algorithms and applications, Neural Networks 13 (2000) 411–430.
- [26] C. Zang, M.I. Friswell, M. Imregun, Structural damage detection using independent component analysis, Structural Health Monitoring 3 (2004) 69–83.
- [27] M.J. Roan, J.G. Erling, L.H. Sibul, A new, non-linear, adaptive, blind source separation approach to gear tooth failure detection and analysis, Mechanical Systems and Signal Processing 16 (2002) 719–740.
- [28] C. Serviere, P. Fabry, Blind source separation of noisy harmonic signals for rotating machine diagnosis, Journal of Sound and Vibration 272 (2004) 317–339.
- [29] J. Antoni, S. Braun, Special issue on blind source separation: editorial, Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 1163–1165.
- [30] J. Antoni, Blind separation of vibration components: principles and demonstration, Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 1166–1180.
- [31] H. Sawada, R. Mukai, S. Araki and S. Makino. (2004). A Robust and precise Method for Solving the Permutation Problem of Frequency-Domain Blind Source Separation. IEEE Trans. on Speech and Audio Process., vol. 12, no. 5.

- [32] T. Lee. (1998). Independent Component Analysis-Theory and Applications. Norwell, MA: Kluwer.
- [33] J. M. Ko, Z. G. Sun, and Y. Q. Ni, "Multi-stage identification scheme for detecting damage in cable-stayed Kap Shui Mun Bridge," *Eng. Struct.*, vol. 24, no. 7, pp. 857–868, 2002.
- [34] W. T. Yeung and J. W. Smith, "Damage detection in bridges using neural networks for pattern recognition of vibration signatures," *Eng. Struct.*, vol. 27, no. 5, pp. 685–698, 2005.
- [35] J. J. Lee, J. W. Lee, J. H. Yi, C. B. Yun, and H. Y. Jung, "Neural networks-based damage detection for bridges considering errors in baseline finite element models," *J. Sound Vib.*, vol. 280, no. 3, pp. 555–578, 2005.
- [36] J. J. Lee and C. B. Yun, "Damage diagnosis of steel girder bridges using ambient vibration data," *Eng. Struct.*, vol. 28, no. 6, pp. 912–925, 2006.
- [37] H.-N. Li, D.-S. Li, and G. Song, "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering," *Eng. Struct.*, vol. 26, no. 11, pp. 1647–1657, 2004.
- [38] J. M. Ko and Y. Q. Ni, "Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges," *Eng. Struct.*, vol. 27, no. 12, pp. 1715–1725, Oct. 2005.
- [39] F. C. Bridges, H. Sheng-nan, L. U. Xin-zheng, Y. E. Lie-ping, and L. I. U. Ying-kui, "Large-scale Experimental Study on the Safety Monitoring for Continuous Rigid Bridge Model and Test Scheme," no. 704003, pp. 2278–2283, 2006.
- [40] Mehrjoo M, Khaji N, Moharrami H, Bahreininejad a. Damage detection of truss bridge joints using Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*. 2008; 35(3): pp. 1122–1131.
- [41] L. I. U. Chun-cheng, L. Jiao, and L. Li-jun, "Study on the Damage Identification of Long-Span Cable-Stayed Bridge Based on Support Vector Machine," in *Information Engineering and Computer Science, 2009. ICIECS 2009. International Conference on, 2009*, pp. 1–4.

- [42] D. Hester and A. Gonzalez, "A wavelet-based damage detection algorithm based on bridge acceleration response to a vehicle," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 28, pp. 145–166, 2012.
- [43] J. Shu, Z. Zhang, I. Gonzalez, and R. Karoumi, "The application of a damage detection method using Artificial Neural Network and train-induced vibrations on a simplified railway bridge model," *Eng. Struct.*, vol. 52, pp. 408–421, 2013.
- [44] K.-C. Chang, C.-W. Kim, and M. Kawatani, "Feasibility investigation for a bridge damage identification method through moving vehicle laboratory experiment," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 328–345, 2014.
- [45] I. Talebinejad, H. Sedarat, A. Emami-Naeini, A. Krimotat, and J. Lynch, "Implementation of damage detection algorithms for the Alfred Zampa memorial suspension bridge," in *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, 2014, p. 906312.
- [46] Yang, Y.-B; Lin, C. W and Yau, J. D, "Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 272, no. 3-5, p. 471–493, 2004.
- [47] Yang, Y. B and Lin, C. W, "Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 284, no. 1-2, pp. 205-226, 2005.
- [۴۸] عسگری، م. شفیق م. آژیده، ع. تحلیل دینامیکی اثرات متقابل سازه انعطاف پذیر پل و خودرو متحرک، شانزدهمین کنفرانس سالانه مکانیک دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران، کرمان، اردیبهشت ۱۳۸۷
- [49] Meirovitch, L., *Analytical Methods in Vibration*, New York McMillan 1967.
- [50] 4. Yang, Y. B., Lin, C.W. and Yau, J. D. (2004), "Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle," *Journal of Sound and Vibration*, **272**(3-5), pp 471–493.
- [51] Paganelli, A. "Dynamic Response of Structural Elements Undergoing Moving Loads and Thermal Strains Using Finite Elements" , Thesis Submitted To The Faculty of University of Minnesota.(2014)
- [52] Lin, C. W and Yang, Y. B, "Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: an experimental verification," *Engineering Structures*, vol. 27, no. 13, p. 1865–1878, 2005.
- [53] Fan, W; Qiao, P. Z, "Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study," *Structural Health Monitoring*, vol. 10, no. 1, pp. 83-111, 2011.

- [54] A. K. Pandey, M. Bisvwas and M. M. Samman, "*Damage Detection From Changes In Curvature Mode Shapes*", *Journal of Sound and Vibration* (1991) 145(2), 321-332.
- [55] Cardoso, J. F. (1998), "Blind signal separation: statistical principles," Proceedings of the IEEE, **86** (10), pp 2009-2025.
- [56] Hyvarinen, A., Karhunen, J. E. and Oja. (2001), "Independent Component Analysis," John Wiley & Sons, INC. New York, ISBN 0-471-22131-7.
- [57] Poncelet, F., Kerschen, G., Golinval, J. C., Verhelst, D. (2007), "Output-only modal analysis using blind source separation techniques," *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**(23), pp 2335–2358.
- [58] Belouchrani, A. K., Abed-Meraim, J.F., Cardoso, J.F. and Moulines, E.A. (1997), "blind source separation technique using second order statistics," *IEEE Transactions on Signal Processing*, **45**(2), pp 434-444.
- [59] Brincker, R., Zhang, L., and Andersen, P. (2001), "Modal identification of output only systems using frequency domain decomposition," *Journal of Smart Materials and Structures*, **10**, pp 441- 445.

Abstract

To identify the condition of the instrument on the bridges, it is necessary to determine their dynamic properties, including Mode shapes, and examine them. Structural health monitoring(SHM) methods are now considered as the most popular method for structural repair and maintenance using dynamic structure responses. The structural health monitoring of the bridge is done with two approaches, direct and indirect monitoring. On the right foot, several sensors are installed in different parts of the bridge, and a vehicle with known characteristics passes through the bridge as a trigger. But on the indirect foot, the sensor is mounted on the vehicle. In this case, the car also acts as a receiver as an actuator. In both methods, the dynamic response generated by the interaction between the bridge and the direct-curved beam, modeled under load, is given as the input signal to the blind source separation (BSS). Independent Component Analysis (ICA) and Second-Order Blind Identification (SOBI) are two basic algorithms for BSS techniques. One of the outcomes of these algorithms is the shape of the bridge structure. To verify the results, its comparison with the results of the analytical method of finite element has been used. In the end, using the formulas obtained, the location of damage was identified in the straight and curved bridges. The results show the ability, accuracy, and accuracy of blind source separation in the context of structural dynamics.

Keywords: Monitoring the structural health of the bridge, Interaction of the bridge-Vehicle, blind source separation , Structural Mode shapes, Curvature of Mode Shapes.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

**Estimation of bridge eigenfrequencies based on vehicle responses using
blind source separation (BSS).**

By:

Maryam Ghasemi Adkan

Supervisor:

Dr. Ali Keyhani

Adviser:

Mr. Omid Khadem Hosseyni

september 2017