

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران  
پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش سازه

شناسایی غیر مستقیم پارامترهای دینامیکی پل بوسیله‌ی خودروی  
عبوری و الگوریتم جستجوی ذرات باردار (CSS)

نگارنده : شیرین احمدی

استاد راهنما :  
دکتر علی کیهانی

استاد مشاور :  
مهندس امید خادم حسینی

شهریور ۱۳۹۶



تقدیم به پدر و مادر عزیزم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان  
به پاس عاطفه سرشار و کرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین

روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریادس است و سرگردانی و ترس در پناهشان

به شجاعت می گزاید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

## سپاس

سپاس بی‌کمران پروردگار یکتا را که، هستیم بخشد و به طریق علم و دانش، نمونه‌م‌ش‌د و به، هم‌نشینی  
رهروان علم مفتخرم نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیم ساخت. از استاد ارجمند و  
که اقدرم جناب آقای دکتر کیهانی که، رهنمودهایشان، همواره راهگشای اینجانب بوده است،  
صمیمانه کمال تشکر و قدردانی می‌نمایم و از خداوند منان توفیقات روز افزون، سلامتی و سرفرازی  
را برای ایشان خواستارم.

همچنین از آقای مهندس امید خادم حسینی که از مشاوره با ایشان بهره‌مند بوده‌ام صمیمانه تشکر و  
سپاسگزاری می‌نمایم و امیدوارم، همواره در زندگی پیروز و سربلند باشند.

از هم‌پدی دوستانی که در این مدت مرایه‌اری نمودند سپاسگزارم و برای این عزیزان آرزوی  
موفقیت دارم.

## تعهد نامه

اینجانب شیرین احمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران-سازه دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه شناسایی غیر مستقیم پارامترهای دینامیکی پل بوسیله‌ی خودروی عبوری و الگوریتم جستجوی ذرات باردار (CSS) تحت راهنمایی جناب آقای دکتر علی کیهانی و جناب آقای مهندس امید خادم حسینی 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.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

سازه‌های پل به عنوان بخش مهمی از شبکه‌ی ارتباطی، تحت افت مداوم قرار دارند و نظارت بر آنها جهت اجرای زود هنگام عملیات پیش‌گیرانه‌ی آسیب، امری ضروری است. بر این اساس در پایان نامه‌ی حاضر با استفاده از روش شناسایی غیر مستقیم، به سلامت‌سنجی و شناسایی پارامترهای مودال پل پرداخته شده است. در حالت کلی، سلامت‌سنجی پل به دو روش مستقیم و غیر مستقیم انجام می‌شود. روش‌های مستقیم شامل نصب سنسور بر روی سازه‌ی پل می‌باشد و در روش‌های غیر مستقیم، خودروی مجهز به شتاب سنج از روی پل عبور کرده و به ثبت پاسخ‌های دینامیکی پل می‌پردازد. در سال‌های اخیر، روش‌های غیر مستقیم به علت مزایایی که فراهم می‌سازند، جایگزین روش‌های مستقیم شده است. از سوی دیگر، الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی ذرات باردار به ندرت جهت سلامت‌سنجی پل بکار برده شده است.

روش ارائه شده در پایان نامه‌ی حاضر، بر خلاف روش‌های رایج انتقال از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس، مبتنی بر استفاده از روش بهینه‌یابی می‌باشد. لذا در گام نخست با استفاده از روابط اندرکنش پل-خودروی عبوری، مدل‌سازی حرکت خودرو از روی پل انجام شده است. سپس با در اختیار داشتن شتاب خودروی عبوری، سختی پل (که شاخصی مناسب جهت تعیین وضعیت سلامت سازه می‌باشد) و برخی خصوصیات خودرو، به عنوان متغیرهای بهینه‌یابی در نظر گرفته شده است. در نهایت به کمک الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی ذرات باردار، مقادیر متغیرها به گونه‌ای تعیین شده است که اختلاف پاسخ شتاب بین حالت واقعی و مقادیر بدست آمده از الگوریتم در هر گام کمینه گردد. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، امکان شناسایی پارامترهای سیستم پل-خودرو از شتاب‌های خودروی عبوری را فراهم می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** روش‌های غیر مستقیم سلامت سنجی، الگوریتم جستجوی ذرات باردار،

تشخیص آسیب، پارامترهای دینامیکی پل، شتاب‌های خودروی عبوری

## لیست مقاله‌های استخراج شده از پایان‌نامه :

۱- تشخیص آسیب‌های پل بوسیله‌ی پاسخ بدست آمده از خودروی عبوری و الگوریتم

جستجوی ذرات باردار

اولین کنفرانس ملی مهندسی راه و ترابری، ایران، گیلان



## فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۵	۱-۲- تاریخچه روش های سلامت سنجی پل ها
۶	۱-۳- صورت مسئله
۶	۱-۴- اهداف تحقیق
۷	۱-۵- فرضیات تحقیق و محدودیتها
۷	۱-۶- ساختار فصول پایان نامه
۹	فصل ۲: الگوریتم بهینه یابی جستجوی ذرات باردار
۱۰	۲-۱- مقدمه
۱۰	۲-۲- روش های تقریبی
۱۱	۲-۲-۱- الگوریتم های تقریبی
۱۱	۲-۲-۲- الگوریتم های کاوشی
۱۲	۲-۳- الگوریتم های فراکاوشی
۱۲	۲-۳-۱- تابع هدف
۱۳	۲-۳-۲- قیود
۱۳	۲-۳-۳- اکتشاف و استخراج
۱۴	۲-۳-۴- تنظیم پارامترها
۱۴	۲-۳-۵- معیارهای توقف
۱۵	۲-۴- الگوریتم های فراکاوشی مبتنی بر یک پاسخ و جمعیت محور
۱۶	۲-۵- الگوریتم بهینه یابی جستجوی ذرات باردار (CSS)
۱۷	۲-۵-۱- قوانین فیزیکی حاکم بر الگوریتم
۱۹	۲-۵-۲- ارائه الگوریتم جستجوی ذرات باردار
۱۹	۲-۵-۳- ساختار الگوریتم در قالب شبه کد
۲۳	۲-۵-۴- قوانین الگوریتم جستجوی ذرات باردار
۲۷	فصل ۳: اندرکنش پل-خودرو
۲۸	۳-۱- مقدمه
۲۹	۳-۲- سازه ی پل تحت عبور مدل خودروی تک محوره
۳۳	۳-۳- سازه ی پل تحت عبور مدل خودروی دو محوره (جسم صلب)

- ۳-۴- سازه‌ی پل تحت عبور مدل خودروی دو محوره با در نظر گرفتن اثر الاستیک تایر..... ۳۷
- ۳-۴-۱- مدل سازی خودرو..... ۳۷
- ۳-۴-۲- مدل سازی پروفیل..... ۳۹
- ۳-۴-۳- مدل سازی پل..... ۴۰
- ۳-۴-۴- معادلات همبست پل-خودرو..... ۴۱
- ۳-۵- تعیین فرکانس های اصلی پل و خودرو به کمک سیگنال های شتاب خودرو..... ۴۳

#### فصل ۴: مدل سازی عددی ۴۵

- ۴-۱- مقدمه..... ۴۶
- ۴-۲- آنالیز نمونه های اندرکنش پل-خودروی تک محوره..... ۴۷
- ۴-۳- آنالیز نمونه های اندرکنش پل-خودروی دو محوره (جسم صلب)..... ۵۴
- ۴-۴- آنالیز نمونه های اندرکنش پل-خودروی دو محوره با در نظر گرفتن اثر الاستیک تایر..... ۵۹

#### فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادها ۶۷

- ۵-۱- مقدمه..... ۶۸
- ۵-۲- محتوا..... ۶۸
- ۵-۳- پیشنهادها..... ۶۹

#### فصل ۶: مراجع ۷۱

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) طبقه بندی انواع روش های بهینه یابی [۳۵]..... ۱۱
- شکل (۲-۲) نیروی وارد شده بر هر ذره در فضا از سوی سایر ذرات ..... ۱۸
- شکل (۳-۲) فلوجارت الگوریتم بهینه یابی جستجوی ذرات باردار مبتنی بر شبه کد ارائه شده ..... ۲۵
- شکل (۱-۳) پل تحت سیستم متحرک جرم و فنر..... ۲۹
- شکل (۲-۳) نمایش درجات آزادی تیر ساده برای تحلیل اجزاء محدود..... ۳۱
- شکل (۳-۳) مدل خودروی دو محوره..... ۳۳
- شکل (۴-۳) پل تحت سیستم خودروی دو محوره..... ۳۴
- شکل (۵-۳) پل تحت سیستم خودروی دو محوره با در نظر گرفتن اثر الاستیک تیر و پروفیل جاده..... ۳۷
- شکل (۱-۴) تغییر شکل قائم نقطه‌ی وسط پل (مدل اندرکنش پل-خودروی تک محوره)..... ۴۸
- شکل (۲-۴) شتاب قائم خودرو (مدل اندرکنش پل-خودروی تک محوره)..... ۴۸
- شکل (۳-۴) اعمال FFT بر شتاب خودرو (مدل اندرکنش پل-خودروی تک محوره)..... ۴۹
- شکل (۴-۴) نمودار همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی تک محوره (مجهول مسئله: سختی پل)..... ۵۰
- شکل (۵-۴) نمودار همگرایی الگوریتم خودروی تک محوره (مجهولات: جرم و سختی خودرو، سختی پل)..... ۵۱
- شکل (۶-۴) همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی تک محوره (مجهولات: سختی المان‌های پل آسیب دیده)..... ۵۲
- شکل (۷-۴) شتاب قائم خودرو زمانی که نوپز به آن اعمال شود برای اندرکنش پل-خودروی تک محوره (مجهولات: سختی المان‌های پل آسیب دیده، جرم و سختی خودرو)..... ۵۳
- شکل (۸-۴) همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی تک محوره (مجهولات: جرم و سختی خودرو، سختی پل آسیب دیده)..... ۵۴
- شکل (۹-۴) تغییر شکل قائم نقطه‌ی وسط پل (مدل اندرکنش پل-خودروی دو محوره)..... ۵۶
- شکل (۱۰-۴) شتاب قائم خودرو (مدل اندرکنش پل-خودروی دو محوره)..... ۵۶
- شکل (۱۱-۴) اعمال FFT بر شتاب خودرو (مدل اندرکنش پل-خودروی تک محوره)..... ۵۷
- شکل (۱۲-۴) نمودار همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی دو محوره (مجهول مسئله: سختی پل)..... ۵۸
- شکل (۱۳-۴) پروفیل جاده..... ۶۰

- شکل (۴-۱۴) تغییر شکل قائم نقطه‌ی وسط پل در مدل اندرکنش پل-خودروی دو محوره (با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر)..... ۶۰
- شکل (۴-۱۵) شتاب های قائم دو محور خودرو در مدل اندرکنش پل-خودروی دو محوره (با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر)..... ۶۱
- شکل (۴-۱۶) اعمال FFT بر شتاب های قائم محور جلوی خودرو در مدل اندرکنش پل-خودرو دو محوره (با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر)..... ۶۲
- شکل (۴-۱۷) نمودار همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی دو محوره (با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر، مجهول مسئله: سختی پل)..... ۶۳
- شکل (۴-۱۸) نمودار همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی دو محوره (با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر، مجهول مسئله: سختی پل آسیب دیده)..... ۶۴

## فهرست جداول

- جدول (۱-۴) پارامترهای پل و مجموعه‌ی جرم-فتر مدل‌سازی شده (اندرکنش پل-خودروی تک محوره)..... ۴۷
- جدول (۲-۴) پارامترهای پل و مجموعه‌ی جرم-فتر (اندرکنش پل-خودروی دو محوره)..... ۵۵
- جدول (۳-۴) پارامترهای پل و مجموعه‌ی جرم-فتر مدل‌سازی شده (اندرکنش پل-خودروی دو محوره با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر)..... ۵۹
- جدول (۴-۴) درصد خطای الگوریتم جستجوی ذرات باردار در محاسبه‌ی متغیرهای مسائل..... ۶۵
- جدول (۵-۴) درصد خطای الگوریتم جستجوی ذرات باردار در محاسبه‌ی سختی و جرم خودرو..... ۶۵



# فصل ۱:

## مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

امروزه با ساخت سازه‌هایی با انعطاف‌پذیری بالا همانند سازه‌های بلند و پل‌ها، برآورد مشخصات دینامیکی شامل فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و میرایی سازه، جهت پایش سلامت و در صورت نیاز اعمال روش‌های کنترل ارتعاش بر روی این‌گونه سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این میان شاید بتوان پل‌ها را به عنوان المان‌های کلیدی این‌گونه سازه‌ها در نظر گرفت که نیازمند چنین پایش‌هایی می‌باشند. در دهه‌های اخیر و به دلیل افزایش حجم باری و ابعاد وسایل نقلیه، شرایط بارگذاری پل‌ها دست‌خوش تغییراتی شده است. از سوی دیگر شرایط محیطی سبب ایجاد نقص‌های سازه‌ای در تعدادی از پل‌ها شده است. بنابراین نظارت ممتد بر وضعیت سازه‌ای پل‌ها یکی از الزامات پایش رو است.

به طور مرسوم، نگهداری پل عمدتاً متکی به روش‌های بازرسی چشمی می‌باشد که به شدت تغییرپذیر و فاقد دقت کافی است و تنها قادر به تشخیص آسیب‌هایی است که قابل رویت باشند. بنابراین، ممکن است آسیب سازه‌ای پل‌ها ناشناخته باقی بمانند. تعداد بالایی از فروریختگی‌های سازه‌ای در اثر فقدان اطلاعات ظرفیت سازه‌ای روی داده‌اند و پژوهشگران متعددی همچون چوپانیت و فرومسرن [۱] به این مهم اشاره داشته‌اند که بازرسی چشمی به تنهایی برای پایش سلامت پل‌ها کفایت نمی‌کند. در کشورهایی همچون ژاپن، که مستعد بلایای طبیعی هستند، توصیه می‌شود که پایش سلامت زیرساخت‌های مهندسی همانند پل‌ها به صورت مستمر صورت پذیرد [۲]. سیستم‌های مدیریت پل (BMSS)<sup>۱</sup> به همراه بازرسی پل‌ها در کشورهای مختلف، توسعه یافته است [۳]. با این تفاسیر، با افزایش بازرسی پل به منظور بررسی وجود آسیب سازه‌ای، هزینه‌های قابل توجه و

---

<sup>۱</sup> Bridge Management Systems



پیامدهای عملی را برای مدیران و صاحبان پل‌ها در پی خواهد داشت.

روش‌های پایش سلامت سازه‌ای (SHM)<sup>۱</sup>، به تشخیص خودکار رفتارهای سازه‌ای غیرعادی متکی می‌باشند. SHM با استفاده از پاسخ دینامیکی سازه در حال تبدیل شدن به بخشی بسیار محبوب سیستم‌های مدیریت و تعمیر و نگهداری زیرساخت‌ها می‌باشد. کنترل ارتعاشات سازه بدون اطلاع از مشخصات اولیه سیستم غیرممکن است. یکی از معروف‌ترین رویکردهای SHM، استفاده از داده‌های ارتعاشی برای برآورد غیرمخرب آسیب است. روش‌های شناسایی سیستم<sup>۲</sup> سازه‌ای را می‌توان، با توجه به اطلاعات اولیه مورد نیازشان، به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول روش‌های موسوم به ورودی-خروجی<sup>۳</sup> هستند و در آنها باید بازتاب‌های اندازه‌گیری شده (خروجی‌ها) و همچنین تحریک‌های اعمال شده (ورودی‌ها) مشخص باشند. دسته دوم روش‌هایی هستند که در آنها برای شناسایی سیستم نیازی به اطلاع دقیق از تحریک‌های ورودی نمی‌باشد، این روش‌ها به روش‌های خروجی محور<sup>۴</sup> معروف هستند. با توجه به اطلاعات اولیه 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 هزینه نسبتاً بالای این‌گونه آزمایش‌ها از یک طرف و ملاحظات ایمنی سازه از طرف دیگر، در دو دهه اخیر توجه محققین به روش‌های خروجی محور معطوف شده است.

قاعده‌ی کلی بدین ترتیب است که رویداد آسیب در یک سازه، تغییرات در خصوصیات فیزیکی سازه به عنوان مثال افت سختی و در ادامه‌ی آن، تغییرات قابل ملاحظه در خصوصیات دینامیکی را در پی خواهد داشت. بر اساس این که کدام یک از مشخصات دینامیکی یا خصیصه‌ی آسیب لحاظ گردند،

---

<sup>1</sup> Structural Health Monitoring

<sup>2</sup> System identification

<sup>3</sup> Input-output methods

<sup>4</sup> Output only methods

این روش‌های شناسایی آسیب را می‌توان به صورت کلی به چهار گروه زیر تقسیم نمود [۴].

(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. در اغلب تکنیک‌های پایش سلامت مبتنی بر ارتعاش، به منظور بازرسی خصوصیات دینامیکی، تعداد زیادی سنسور روی سازه نصب می‌شوند. این رویکردها، که در آن سنسورها به طور مستقیم روی پل نصب می‌شوند، در اینجا با نام روش‌های مستقیم از آن‌ها یاد می‌شود و نصب ادوات در محل بسته به موقعیت و نوع پل می‌تواند هزینه‌بر، زمان‌بر و حتی خطرناک باشد. روش معمول، سوار کردن سنسورهای ارتعاشی در مکان‌های متفاوت روی پل و اتصال آن‌ها به سیستم جمع‌آوری داده است. در مواردیکه به منظور نصب نتوان ترافیک جاری را محدود نمود، عمل نصب تجهیزات می‌تواند خطرناک باشد.

ایده‌ی رویکرد غیرمستقیم، که خصوصیات دینامیکی سازه‌ی پل از پاسخ دینامیکی وسیله نقلیه‌ی عبوری استخراج می‌شود، اول بار توسط یانگ مطرح گردید [۶ و ۵]. یک چنین رویکردی کم هزینه بوده و در حین حال به دنبال کاهش نصب ادوات روی پل نیز می‌باشد. در این رویکرد، یک وسیله‌ی نقلیه مجهز به سنسور (شتاب‌سنج) می‌باشد که خصوصیات دینامیکی پل از قبیل فرکانس‌های طبیعی از آن استخراج می‌گردد. بواسطه‌ی اندرکنش بین پل و وسیله‌ی نقلیه، وسیله‌ی متحرک را می‌توان همزمان هم به عنوان محرک در نظر گرفت، هم به عنوان گیرنده.

لین و یانگ [۷] به صورت آزمایشگاهی و با عبور یک خودروی مجهز به سنسور از روی یک پل بزرگراه در تایوان نشان دادند که این روش در عمل نیز قابلیت اجرا دارد. در حالتیکه تنها فرکانس‌های

پل مورد نیاز باشد، 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. از سوی دیگر با توجه به اینکه اکثر پل‌ها، مجهز به سنسور نیستند و از عمر طراحی عبور کرده‌اند، این روش می‌تواند جایگزین مناسبی جهت کنترل هرگونه تغییر در رفتار سازه‌ای، ناشی از رویداد آسیب باشد.

## ۱-۲- تاریخچه روش‌های سلامت‌سنجی پل‌ها

در حال حاضر تمرکز اصلی محققان بر تعیین فرکانس‌های طبیعی به عنوان یکی از اصلی‌ترین پارامترهای تعیین وضعیت سلامت سازه و نیز اشکال مودی، معطوف است [۸-۱۳]. تحقیقات انجام شده، مبتنی بر انتقال از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس به عنوان مثال انتقال فوریه (FFT)<sup>۱</sup> و یا تجزیه به مودهای تجربی (EMD)<sup>۲</sup> هستند [۱۴]. اُبرایان<sup>۳</sup> [۱۵] با تعیین میرایی سازه، روشی دیگر برای آنالیز پارامتری سازه ارائه کرده است. همچنین روش‌های متعددی عیب‌یابی سازه را به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌یابی مطرح کرده و پارامترهای مودال را به عنوان تابع هدف مد نظر قرار می‌دهند [۱۶-۱۹]. رن و دی‌روئک<sup>۴</sup> [۲۰ و ۲۱] با طرح روش المان محدود به بررسی تغییرات فرکانس و شکل مودها پرداخته‌اند. اُشیما<sup>۵</sup> و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۰۸ تحقیقات آزمایشگاهی جهت تعیین خصوصیات پل انجام دادند. در تحقیقات انجام شده، فرکانس‌ها از طریق پاسخ‌های خودروی عبوری شناسایی شده است [۲۳-۲۶]. مک‌گتربیک<sup>۶</sup> و همکاران [۲۷-۲۹] از پاسخ خودرو، فرکانس و تغییرات در میرایی پل را استخراج کرده‌اند. اما نتایج نشان دهنده‌ی دشواری شناسایی هم‌زمان هر دو پارامتر

---

<sup>1</sup> Fast Fourier Transform

<sup>2</sup> Empirical Mode Decomposition

<sup>3</sup> O'Brien

<sup>4</sup> Ren and De Roeck

<sup>5</sup> Oshima

<sup>6</sup> McGetric

در صورت در نظر گرفتن پروفیل جاده می‌باشد. گُنزالز<sup>۱</sup> و همکاران [۳۰] آنالیز عددی و آزمایشگاهی انجام داده‌اند. آنها نتیجه گرفتند که تعیین مقدار دقیق فرکانس پل تنها در سرعت‌های حرکت پایین و در صورت تحریک پل به میزان کافی، امکان پذیر است. بنابراین حضور پروفیل سطح جاده، طیف پاسخ را مخدوش ساخته و مانع تعیین فرکانس طبیعی پل می‌شود. آنها همچنین نتیجه گرفتند حضور ترافیک سنگین و سرعت پایین حرکت خودرو، سبب ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ در مقایسه با ناهمواری‌های جاده می‌شود و روند تشخیص فرکانس‌های پل را بهبود می‌بخشد. تحقیقات زیادی جهت بررسی تأثیر پروفیل جاده بر پاسخ‌های خودرو انجام شده است [۳۱ و ۳۲].

### ۱-۳- صورت مسئله

در این پایان‌نامه سعی شده است به کمک نرم‌افزار متلب، مدل‌سازی اندرکنش پل-خودرو برای مدل اجزاء محدودی پل و سه مدل متفاوت خودرو (تک محوره، دو محوره و دو محوره همراه با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر) انجام شود. پاسخ‌های دینامیکی خودرو از مدل‌سازی مذکور استخراج گردیده است. در نهایت با استفاده از یک روش مهندسی معکوس و با در دست بودن شتاب‌های خودرو، به شناسایی خصوصیات پل و خودروی عبوری، نظیر سختی پل و جرم و سختی خودرو و تشخیص آسیب پل پرداخته شده است.

### ۱-۴- اهداف تحقیق

تاکنون بیشتر اطلاعات مربوط به فرکانس و پارامترهای مودال مورد توجه قرار گرفته‌اند و به سایر پارامترهای پل مانند سختی که مستقیماً وضعیت سلامت سازه را مشخص می‌کنند، کمتر پرداخته شده است. در پایان‌نامه‌ی حاضر سعی شده است تا با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی و

---

<sup>1</sup> Gonza' lez

پاسخ‌های دینامیکی خودروی عبوری حاصل از روابط اندرکنش پل-خودروی مدل‌سازی شده در متلب، به تعیین پارامترهای پل بپردازیم. الگوریتمی که در اینجا مورد استفاده قرار می‌گیرد الگوریتم جستجوی ذرات باردار<sup>۱</sup> (CSS) می‌باشد که اولین بار در سال ۲۰۱۰ توسط کاوه و همکاران [۳۴] و [۳۳]، ارائه شده است. اساس کار این الگوریتم، قوانین حاکم بر ذرات باردار (قانون کولمب و ...) می‌باشد و جواب‌ها (ذرات باردار) در فضای جستجو از هم تأثیر می‌پذیرند.

## ۱-۵- فرضیات تحقیق و محدودیتها

فرضیاتی که در پایان‌نامه‌ی حاضر مد نظر قرار گرفته است به شرح زیر می‌باشد:

- رفتار مواد ارتجاعی فرض شده است.
- برای تحلیل پل، از تحلیل الاستیک استفاده شده است.
- در روند حل مسائل اندرکنش پل-خودرو، تحلیل غیر خطی انجام شده است.

## ۱-۶- ساختار فصول پایان‌نامه

این پایان‌نامه در پنج فصل به شرح زیر تدوین شده است:

در **فصل اول**، جهت آشنایی با موضوع مورد بررسی، مقدمه‌ای بر پایان‌نامه‌ی حاضر ارائه شده است.

در **فصل دوم**، اطلاعاتی در ارتباط با الگوریتم‌های بهینه‌یابی ارائه شده است و سپس به تشریح کامل الگوریتم جستجوی ذرات باردار پرداخته شده است.

در **فصل سوم**، روابط اندرکنش پل-خودروی عبوری، برای سه حالت خودروی تک محوره، دو

---

<sup>۱</sup> Charged System Search (CSS)

محوره و دو محوره همراه با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تاثیر مدل‌سازی شده است.

در **فصل چهارم**، با ارائه‌ی مثال‌های عددی متفاوت مجموعه مطالب بیان شده در فصل‌های

قبل این پایان‌نامه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در **فصل پنجم**، نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهادات جهت ادامه‌ی تحقیقات بیان شده

است.

## فصل ۲:

### الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی ذرات باردار

## ۲-۱- مقدمه

انسان ذاتاً تمام فعالیت‌هایش را به شکلی انجام می‌دهد که حتی المقدور انرژی را صرفه‌جویی نماید. این تمایل باید به نحوی باشد که با توجه به منابع محدود، بهترین خروجی یا بیشینه‌ی سود حاصل گردد. از این منظر واضح است هر فرآیندی پتانسیل مطرح شدن به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌یابی را دارا می‌باشد. به عبارتی دیگر مسائل کاربردی و چالشی زیادی در زمینه‌های علمی، مهندسی، صنعتی، اقتصادی و تجاری پیش رو قرار دارند که می‌توان آنها را به صورت مسائل بهینه‌یابی بسیار پیچیده فرمول‌بندی کرد. با توجه به درجه‌ی پیچیدگی مسائل، روش‌های دقیق<sup>۱</sup> (برنامه ریزی ریاضی<sup>۲</sup>) و یا روش‌های تقریبی<sup>۳</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش‌های دقیق، جهت دست‌یابی به پاسخ بهینه ناگزیر اطلاعات گرادینانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که متضمن بهینه بودن پاسخ خواهد بود. از سوی دیگر استفاده از چنین روش‌هایی در مسائل پیچیده مستلزم استفاده از روابط بسیار پیچیده‌ی ریاضی است که عموماً مطلوب نمی‌باشد. روش‌های تقریبی قابلیت حل اکثر مسائل بهینه‌یابی در زمان مناسب را دارا می‌باشند. در ادامه ابتدا انواع روش‌های تقریبی معرفی شده و سپس به بیان مسائل اساسی مطرح در این حوزه پرداخته شده است. در نهایت نیز الگوریتم جستجوی ذرات باردار که در پایان‌نامه‌ی حاضر مورد استفاده قرار گرفته، به تفصیل شرح داده شده است.

## ۲-۲- روش‌های تقریبی

در بررسی روش‌های تقریبی دو گروه‌بندی مطرح است:

---

<sup>۱</sup> Deterministic

<sup>۲</sup> Mathematical Programming

<sup>۳</sup> approximate



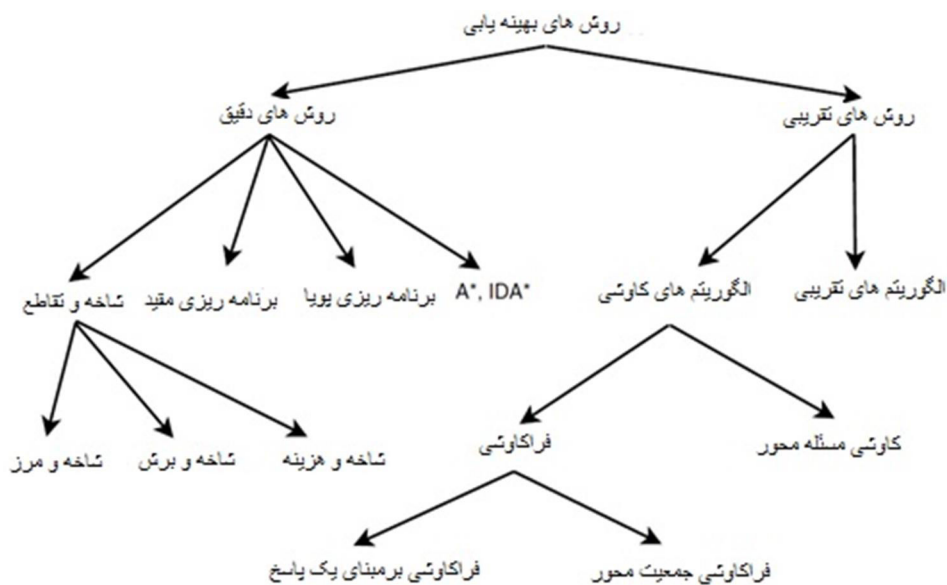
## ۱-۲-۲- الگوریتم‌های تقریبی

با استفاده از این الگوریتم‌ها ارزیابی بهتری از درجه‌ی پیچیدگی مسئله بدست می‌آید، اما ممکن است میان پاسخ‌های حاصل با پاسخ بهینه اختلاف مشاهده شود. به موجب ضعف‌های اساسی، کاربرد این روش در حل مسائل بهینه‌یابی محدود است.

## ۲-۲-۲- الگوریتم‌های کاوشی<sup>۱</sup>

این الگوریتم‌ها به نوبه‌ی خود به دو گروه الگوریتم‌های کاوشی مسائل خاص<sup>۲</sup> که مسئله محور است و برای حل هر مسئله مستلزم طراحی الگوریتم خاص می‌باشند و الگوریتم‌های فراکاوشی<sup>۳</sup> که قابلیت حل اکثر مسائل را دارا هستند، تقسیم‌بندی می‌شود.

نمودار معرف طبقه بندی انواع روش‌های بهینه‌یابی در زیر ارائه شده است [۳۵]:



شکل (۱-۲) طبقه بندی انواع روش‌های بهینه‌یابی [۳۵]

<sup>1</sup> Heuristics

<sup>2</sup> Specific Heuristics

<sup>3</sup> Metaheuristics

گام نخست در کاربرد روش‌های بهینه‌یابی، تشکیل مدل ریاضی منطبق با مسئله‌ی مورد بررسی است. عموماً این مدل‌ها تقریبی و در واقع ساده شده‌ی مسائل حقیقی می‌باشند. با تشکیل چنین مدلی، دید مناسبی از میزان پیچیدگی مسئله ایجاد می‌شود و به دنبال آن امکان انتخاب روش بهینه‌یابی مناسب فراهم می‌آید. به عنوان مثال در صورتیکه الگوریتم دقیق برای حل مسئله در مدت زمان منطقی وجود داشته باشد، این الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند و در غیر این صورت الگوریتم‌های فراکاوشی جایگزین مناسبی هستند.

## ۲-۳- الگوریتم‌های فراکاوشی

الگوریتم‌های فراکاوشی بر پایه‌ی الهام از پدیده‌های طبیعی بنا شده‌اند. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده<sup>۱</sup> که تقلیدی از پدیده‌ی سرد شدن فلزات برای ساخت یک روند جستجو است و یا الگوریتم کلونی مورچگان<sup>۲</sup> که با الهام از زندگی دسته جمعی مورچه پی‌ریزی شده است، نمونه‌هایی از الگوریتم‌های فراکاوشی با الهام از پدیده‌های طبیعی هستند.

برخی مفاهیم اساسی که در بین تمام الگوریتم‌های فراکاوشی بصورت مشترک مطرح است در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲-۳-۱- تابع هدف<sup>۳</sup>

بنا به دلایل بهبود کارایی و اثر بخشی، ممکن است تابع هدایت‌گر متفاوت با تابع هدف مدل ریاضی باشد. به عنوان مثال کار کردن با توابع هدف چند گانه پیچیده است و معمولاً از آن پرهیز می‌شود. دو روش عمومی برای کاهش توابع هدف به یک تابع وجود دارد.

---

<sup>1</sup> Simulated Annealing

<sup>2</sup> Ant Colony

<sup>3</sup> Objective Function

۱. روش اول: تشکیل تابع هدف مرکبی که جایگزین همه‌ی توابع هدف می‌شود.
۲. روش دوم: انتخاب مهمترین تابع هدف از میان تمام آنها و اعمال محدودیت به جای سایر توابع هدف.

## ۲-۳-۲- قیود<sup>۱</sup>

ویژگی مهم دیگر در الگوریتم‌های فراکاوشی، نحوه‌ی برخورد آنها با محدودیت‌ها است. اکثر این محدودیت‌ها بر پاسخ و یا تابع هدف اعمال می‌شوند. این قیود می‌توانند بصورت خطی یا غیر خطی، مساوی یا نامساوی باشند. تعریف حدود بالا و پایین برای متغیرهای مسئله نمونه‌ای از قیود نامساوی است و در مقابل، معادلات تعادل یک سازه مثالی از قیود تساوی ارائه می‌دهد. برخی روش‌های برخورد با قیود به طور خلاصه به شرح زیر هستند:

۱. استراتژی‌های حذفی: شامل حذف پاسخ‌های غیر منطقی بصورت خودکار می‌باشد و در صورتیکه پاسخ‌های نامناسب سهم کوچکی از کل پاسخ‌ها را به خود اختصاص دهند، قابل قبول است.
۲. استراتژی‌های جریمه‌ای: شامل حفظ پاسخ‌های نامناسب است. به این ترتیب تابع هدف فاقد محدودیت، به کمک یک تابع جریمه که پاسخ‌های غیر منطقی را جریمه می‌کند تعمیم پیدا می‌کند.
۳. استراتژی‌های اصلاحی: شامل تغییر پاسخ‌های غیر منطقی به پاسخ‌های منطقی است.

## ۲-۳-۳- اکتشاف<sup>۲</sup> و استخراج<sup>۳</sup>

در بررسی الگوریتم‌های فراکاوشی، دو معیار متناقض دیگر را مورد توجه قرار می‌دهیم که

---

<sup>1</sup> Constraints  
<sup>2</sup> Exploration  
<sup>3</sup> Exploitation

شامل جستجوی فضای کاوش (اکتشاف) و استخراج بهترین پاسخ می‌باشند. در معیار استخراج توجه معطوف به بررسی مناطقی است که احتمال حضور پاسخ بهینه در آن وجود دارد؛ درحالی‌که در اکتشاف به منظور ایجاد امکان بررسی یکسان تمام فضای جستجو، سایر مناطق نیز مورد توجه قرار می‌گیرند.

## ۲-۳-۴- تنظیم پارامترها<sup>۱</sup>

از نکات اساسی مطرح در تمام الگوریتم‌های فراکاوشی می‌توان به تنظیم پارامترها اشاره کرد. این پارامترها در تمام الگوریتم‌ها حضور دارند و تأثیر زیادی بر کارایی و اثر بخشی جستجو می‌گذارند. مقادیر بهینه‌ی آنها بسته به مسئله‌ی مورد بررسی و نیز زمانی که جهت حل مسئله صرف می‌شود متغیر است و امکان تعیین آنها از قبل وجود ندارد.

## ۲-۳-۵- معیارهای توقف

برخی معیارهای توقف به شرح زیر هستند:

۱. حداکثر تعداد تکرار: فرآیند بهینه‌یابی پس از تعداد تکرار مد نظر، متوقف می‌گردد.
۲. تعداد معینی تکرار در صورت عدم مشاهده‌ی بهبود پاسخ: هنگامی که در تعداد مشخصی تکرار شاهد بهبود حل نباشیم، الگوریتم متوقف می‌گردد.
۳. حداقل خطای تابع شایستگی: تفاوت میان مقادیر بهترین تابع شایستگی و بهترین حل کلی از آستانه‌ی انتظار از پیش تعیین شده، کمتر گردد.
۴. اختلاف میان بهترین و بدترین ذرات: اگر اختلاف میان بهترین و بدترین مقادیر حاصل از تابع شایستگی از مقدار معینی کمتر شود، عمل بهینه‌یابی متوقف می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Parameter Tunning

## ۲-۴- الگوریتم‌های فراکاوشی مبتنی بر یک پاسخ<sup>۱</sup> و جمعیت

### محور<sup>۲</sup>

معیارهای متفاوتی در تقسیم بندی الگوریتم‌های فراکاوشی وجود دارد. در یک تقسیم‌بندی می‌توان از دو گروه مبتنی بر یک پاسخ و نیز جمعیت محور یاد کرد. در الگوریتم‌های مبتنی بر یک پاسخ، تنها یک پاسخ مورد بررسی قرار می‌گیرد و در طی مدت جستجو شاهد تغییر و بهبود آن خواهیم بود. این روش‌ها در مقابل الگوریتم‌های جستجوی جمعیت محور قرار دارند. در الگوریتم‌های جمعیت محور ابتدا جمعیت اولیه تشکیل می‌شود، سپس طی فرآیندهایی که بسته به الگوریتم انتخابی متفاوت هستند، جمعیت جدیدی تولید می‌شود. در نهایت انتخاب میان جمعیت جدید و جمعیتی که از ابتدا ایجاد شده بود صورت می‌گیرد. این الگوریتم‌ها اکتشاف محور هستند و برای ایجاد جمعیت جدید، کل فضای جستجو را مورد بررسی قرار می‌دهند.

در تحقیق حاضر الگوریتم جستجوی ذرات باردار مورد استفاده قرار گرفته است که از الگوریتم‌های جمعیت محور می‌باشد. در این الگوریتم با مکانیزمی که در بخش بعدی به آن اشاره می‌شود، به مرور از ویژگی اکتشاف کاسته می‌شود و در نهایت پس از انتخاب منطقه‌ای که احتمال حضور پاسخ بهینه در آن بیشتر است، به استخراج پاسخ مناسب پرداخته می‌شود. به این ترتیب تعادل میان اکتشاف و استخراج برقرار می‌گردد.

---

<sup>1</sup> Single-solution based Metaheuristics

<sup>2</sup> Population-based Metaheuristics

## ۲-۵- الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی ذرات باردار (CSS)<sup>۱</sup>

این روش از الگوریتم‌های فراکاوشی جدید جمعیت محور است که در سال ۲۰۱۰ توسط کاوه و طلعت اهری [۳۴] معرفی شده است و وابسته به داده‌های گرادیانی و پیوستگی فضای جستجوی مسئله نمی‌باشد. این الگوریتم مبتنی بر استفاده از قوانین فیزیک شامل قوانین گاوس<sup>۲</sup> و کولمب<sup>۳</sup> از الکتریسیته و نیز قوانین نیوتن از مکانیک کلاسیک است. طبق قانون کولمب، نیروی الکتریکی بین دو کره‌ی کوچک باردار با مجذور فاصله‌ی آنها رابطه‌ی معکوس و با حاصلضرب بارها متناسب است. همچنین قانون گاوس بیان می‌کند مقدار میدان الکتریکی برای نقطه‌ای داخل کره‌ی بار متناسب با فاصله‌ی ذرات است. براین اساس هر عامل جستجوگر یک ذره‌ی باردار (CP)<sup>۴</sup> در نظر گرفته می‌شود که با توجه به قوانین گاوس و کولمب بر سایر ذرات نیرویی متناسب با کیفیت پاسخ تولیدی وارد می‌کند. از سوی دیگر، مطابق قانون دوم نیوتن در هر جسم شتابی متناسب با نیروی وارد شده بر آن ایجاد می‌شود. بنابراین نیروی الکتریکی وارد شده بر هر ذره‌ی باردار سبب ایجاد شتاب در آن می‌شود. بر اساس مکانیک نیوتنی، در صورت مشخص بودن موقعیت، سرعت و شتاب اولیه‌ی ذره که به صورت بار نقطه‌ای با ابعاد بی‌نهایت کوچک در نظر گرفته شده است، می‌توان موقعیت آن در هر لحظه را تعیین نمود. به این ترتیب CSS با بکارگیری قوانین حرکت از مکانیک نیوتنی به تعیین موقعیت ذرات باردار می‌پردازد. در ادامه ابتدا به قوانین فیزیکی که الگوریتم با الهام از آنها بنا شده اشاره می‌شود و سپس نحوه‌ی کاربرد این قوانین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

---

<sup>1</sup> Charged System Search

<sup>2</sup> Gauss's law

<sup>3</sup> Coulomb's law

<sup>4</sup> Charged Particle

## ۲-۵-۱- قوانین فیزیکی حاکم بر الگوریتم

### □ قوانین الکتریسیته

طبق مشاهدات کولمب، یک ذره‌ی باردار در اطراف خود تشکیل میدان الکتریکی می‌دهد و توانایی وارد کردن نیرو به ذرات بار موجود در این فضا را دارد. این نیرو از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{ij} = k_e \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \quad (۱-۲)$$

در رابطه‌ی فوق  $k_e$  ثابت کولمب،  $q_i$  و  $q_j$  بارهای الکتریکی و  $r_{ij}$  فاصله‌ی میان ذرات باردار هستند.

میدان الکتریکی  $E_{ij}$  در محدوده‌ی داخل و یا خارج یک ذره‌ی باردار به شعاع  $a$  و بار الکتریکی  $q_i$  یکنواخت طبق رابطه‌ی زیر است.

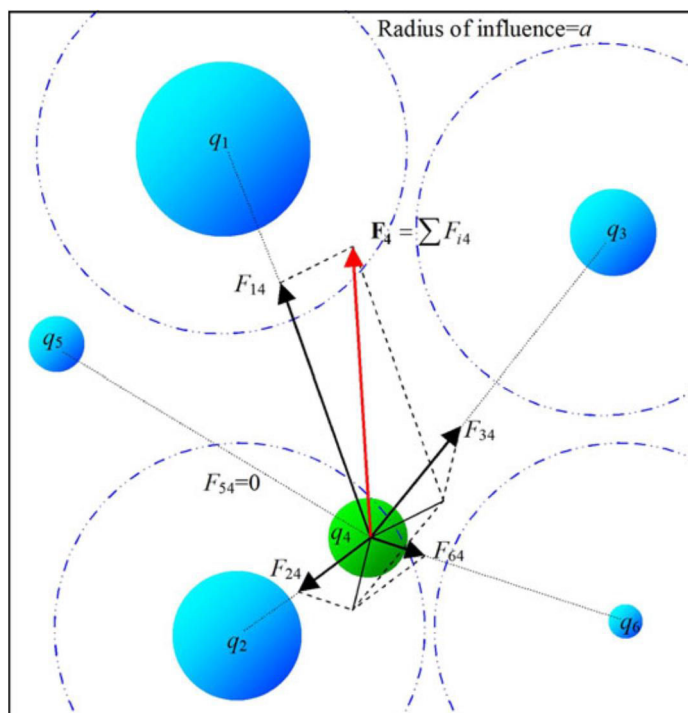
$$\begin{cases} E_{ij} = k_e \frac{q_i}{r_{ij}^2} & r_{ij} \geq a \\ E_{ij} = k_e \frac{q_i}{a^3} r_{ij} & r_{ij} < a \end{cases} \quad (۲-۲)$$

بزرگی و جهت برآیند وارد بر ذره‌ی باردار  $q_j$  با موقعیت  $r_j$  در فضای میدان الکتریکی ذره باردار  $q_i$  با موقعیت  $r_i$ ، برابر است با:

$$F_{ij} = E_{ij} q_j \frac{r_i - r_j}{\|r_i - r_j\|} \quad (۳-۲)$$

در صورت وجود گروهی از ذرات باردار در فضای میدان الکتریکی بار  $q_i$  خواهیم داشت:

$$F_{ij} = E_{ij} q_j \frac{r_i - r_j}{\|r_i - r_j\|} \quad (۴-۲)$$



شکل (۲-۲) نیروی وارد شده بر هر ذره در فضا از سوی سایر ذرات

### □ قوانین مکانیک نیوتنی

در مکانیک نیوتنی یک جسم به صورت ذره با ابعاد قابل چشم‌پوشی فرض می‌شود. در صورت حرکت این ذره در بازه‌ی زمانی  $t_{old}$  تا  $t_{new}$  و از مکان  $r_{old}$  تا مکان ثانویه‌ی  $r_{new}$  بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Delta r = r_{new} - r_{old}$$

$$v = \frac{r_{new} - r_{old}}{\Delta t}$$

$$a = \frac{v_{new} - v_{old}}{\Delta t} \quad (۵-۲)$$

$$r_{new} = \frac{1}{2} a \cdot \Delta t^2 + v_{old} \cdot \Delta t + r_{old}$$

بر اساس قانون دوم نیوتن با فرض اینکه جرم ذره  $m$  باشد، نیروی ایجاد شده  $F = m \cdot a$  خواهد

بود. از روابط (۵-۲) رابطه‌ی زیر نتیجه می‌شود:



$$r_{new} = \frac{1}{2} \frac{F}{m} \Delta t^2 + v_{old} \Delta t + r_{old} \quad (6-2)$$

## ۲-۵-۲- ارائه‌ی الگوریتم جستجوی ذرات باردار

در این روش فضای جستجو (فضای مربوط به تمام راه حل‌های مسئله) یک فضای  $n$  بعدی خواهد بود که  $n$  تعداد متغیرهای موجود در حل مسئله است. هر حل ممکن در این روش به صورت یک ذره‌ی باردار با شعاع تعریف شده در فضای جستجو فرض می‌شود که تحت تأثیر میدان الکتریکی سایر بارها (راه حل‌های موجود) قرار دارد. کمیت نیروهای وارد شده بر هر ذره، توسط قوانین الکترواستاتیک و نحوه‌ی حرکت آن بر اساس قوانین مکانیک نیوتنی تعیین می‌شود.

## ۲-۵-۳- ساختار الگوریتم در قالب شبه کد<sup>۱</sup>

**گام ۱:** مقدار دهی اولیه. موقعیت اولیه‌ی ذرات در فضای جستجو بصورت تصادفی انتخاب و سرعت اولیه‌ی آنها صفر فرض می‌شود. مقادیر تابع شایستگی ذرات مشخص و ذرات بصورت افزایشی ذخیره می‌شوند.

$$x_{i,j}^{(0)} = x_{i,\min} + rand \cdot (x_{i,\max} - x_{i,\min}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7-2)$$

بهترین ذره در بین تمام ذرات  $X_{best}$  و تابع شایستگی مرتبط با آن  $fitbest$  خواهد بود. تعدادی از بهترین ذرات و توابع شایستگی آنها در یک حافظه تحت عنوان حافظه‌ی ذرات  $(CM)^2$  ذخیره می‌شوند.

**گام ۲:** تعیین نیروها. برای هر ذره، بردار نیرو محاسبه می‌شود.

<sup>1</sup> Pseudo-code

<sup>2</sup> Charged Memory

$$F_j = q_j \sum_{i, i \neq j} \left( \frac{q_i}{a^3} r_{ij} \cdot i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}^2} \cdot i_2 \right) p_{ij} (X_i - X_j), \quad \begin{cases} j = 1, 2, \dots, N \\ i_1 = 1, i_2 = 0 \Leftrightarrow r_{ij} < a, \\ i_1 = 0, i_2 = 1 \Leftrightarrow r_{ij} \geq a \end{cases} \quad (8-2)$$

$F_j$  برآیند نیروهای وارد شده بر  $j$  امین ذره،  $N$  تعداد کل ذرات و  $r_{ij}$  فاصله‌ی میان ذرات هستند. همانطور که بیان شد هر CP بصورت یک کره‌ی بار با شعاع  $a$  در نظر گرفته شده که  $a$  برابر یک انتخاب شده است.

مقدار بار هر ذره با توجه به کیفیت ذرات محاسبه می‌شود.

$$q_i = \frac{fit(i) - fit_{worst}}{fit_{best} - fit_{worst}}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9-2)$$

$fit_{best}$  و  $fit_{worst}$  بهترین و بدترین توابع شایستگی در بین تمام ذرات،  $fit(i)$  مقدار تابع شایستگی ذره  $i$  است.

فاصله‌ی بین دو ذره‌ی باردار از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{\|X_i - X_j\|}{\|(X_i + X_j)/2 - X_{best}\| + \varepsilon} \quad (10-2)$$

$X_i$  و  $X_j$  به ترتیب موقعیت  $i$  امین و  $j$  امین ذره،  $X_{best}$  موقعیت بهترین ذره‌ی موجود،  $\varepsilon$  عدد مثبت و بسیار کوچک جهت جلوگیری از صفر شدن مخرج هستند.

$p_{ij}$  احتمال حرکت ذره به سمت سایر ذرات بوده و بصورت تابع زیر محاسبه می‌شود:

$$p_{ij} = \begin{cases} 1 & \frac{fit(i) - fit_{best}}{fit(j) - fit(i)} > rand \vee fit(j) > fit(i) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (11-2)$$

$rand$  عددی دلخواه در بازه‌ی  $(0,1)$  است.

گام ۳: ساختار حل. هر ذره به موقعیت جدید خود حرکت کرده و سرعت جدید آن محاسبه می‌شود.

$$X_{j,new} = rand_{j1} \cdot k_a \cdot \frac{F_j}{m_j} \cdot \Delta t^2 + rand_{j2} \cdot k_v \cdot V_{j,old} \cdot \Delta t + X_{j,old} \quad (12-2)$$

$$V_{j,new} = \frac{X_{j,new} - X_{j,old}}{\Delta t} \quad (13-2)$$

$k_a$  ضریب شتاب جهت کنترل نیروی وارده بر ذرات،  $k_v$  ضریب سرعت برای کنترل سرعت قبلی،  $rand_{j1}$  و  $rand_{j2}$  دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه  $(0,1)$ ،  $m_j$  جرم ذره  $j$  و  $z$  ام و برابر با  $q_j$  و  $\Delta t$  گام زمانی و برابر با واحد هستند. تأثیر سرعت قبلی و نیروی برآیند بر یک ذره بر اساس مقادیر  $k_a$  و  $k_v$  کاهش یا افزایش می‌یابد.

جستجوی بیشتر در تکرارهای اولیه ممکن است باعث افزایش سرعت اکتشاف شود؛ هرچند لازم است به تدریج از این ویژگی کاسته شود. از آنجا که  $k_a$  پارامتری مربوط به نیروهای جذب کننده است، انتخاب مقداری بزرگ برای آن ممکن است موجب همگرایی و مقادیر کوچک سبب افزایش سرعت محاسبه گردد. در حقیقت،  $k_a$  پارامتری برای کنترل توانایی اکتشاف الگوریتم است و انتخاب یک تابع افزایشی می‌تواند باعث بهبود عملکرد الگوریتم شود. همچنین جهت سرعت قبلی یک ذره الزاماً هم جهت با نیروی برآیند آن نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب سرعت توانایی استخراج را کنترل می‌کند و بصورت یک تابع کاهشی انتخاب می‌شود. این ضرایب مطابق رابطه‌ی (۲-۱۴) هستند:

$$k_v = f_v (1 - iter/iter_{max}), \quad k_a = f_a (1 + iter/iter_{max}) \quad (14-2)$$

در این روابط  $iter$  شماره‌ی تکرار کنونی و  $iter_{max}$  برابر تعداد کل تکرارها است. به این ترتیب  $k_v$  به صورت خطی تا صفر کاهش و  $k_a$  تا یک افزایش می‌یابند و تعادل میان اکتشاف و همگرایی

برقرار می‌گردد.

در مسائل تحقیق حاضر، با دو گروه متغیر در فضای جستجو مواجه هستیم. گروه اول متغیرهای گسسته و گروه دوم متغیرهای پیوسته. در مسائل مورد بررسی، متغیرهای گسسته به صورت اعداد صحیح مربوط به شماره‌ی المان آسیب دیده می‌باشد. سایر متغیرها شامل مقادیر سختی هر المان و یا پارامترهای مجهول خودرو می‌باشند که می‌توانند هر مقداری در داخل بازه‌ی مجاز فضای جستجو را اختیار کنند و بنابراین جزء متغیرهای پیوسته می‌باشند. در مسائلی که فضای جستجو هم‌زمان متغیرهای پیوسته و گسسته را در بر گرفته است، مقادیر مناسب برای ضرایب  $f_a$  و  $f_v$  به ترتیب ۳ و ۱ می‌باشد. در سایر مسائل که هیچ المانی آسیب دیده فرض نشده است، تنها با متغیرهای پیوسته مواجه هستیم و هر دوی این ضرایب ۰.۵ هستند.

با جایگذاری مقادیر فوق در روابط (۲-۱۲) و (۲-۱۳)، روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$X_{j,new} = 0.5rand_{j1} \cdot (1 + iter/iter_{max}) \cdot \sum_{i,i \neq j} \left( \frac{q_i}{a^3} r_{ij} \cdot i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}^2} \cdot i_2 \right) p_{ij} (X_i - X_j) + 0.5rand_{j2} \cdot (1 + iter/iter_{max}) \cdot V_{j,old} + X_{j,old} \quad (15-2)$$

$$V_{j,new} = X_{j,new} - X_{j,old} \quad (16-2)$$

$a$  شعاع هر ذره و معادل یک می‌باشد.

**گام ۴:** روند بروزرسانی. در صورتیکه یک ذره‌ی جدید از فضای جستجوی مجاز خارج شود، روشی بر اساس الگوریتم جستجوی هارمونی<sup>۱</sup> (HS) جهت اصلاح موقعیت آن بکار می‌رود. بر اساس این مکانیزم هر عضو از بردار حل که از مرزها خارج شود، از بین اعضای حافظه‌ی بار CM باز تولید

---

<sup>1</sup> Harmony Search

می‌شود و یا اینکه با یک مقدار تصادفی از محدوده مقادیر مجاز جایگزین می‌شود.

$$x_{i,j} = \begin{cases} \text{w.p.CMCR} & \Rightarrow \text{Select a new variable from CM} \\ & \Rightarrow \text{w.p.}(1 - \text{PAR}) \text{ do nothing} \\ & \Rightarrow \text{w.p.PAR choose a neighboring value} \\ \text{w.p.}(1 - \text{CMCR}) & \Rightarrow \text{Select a new value randomly} \end{cases} \quad (17-2)$$

$x_{i,j}$  برابر با  $i$  امین متغیر از ذره‌ی  $j$  ام، CMCR احتمال انتخاب یک مقدار برای بردار حل جدید از مقادیر ذخیره شده در حافظه‌ی ذرات،  $(1-\text{CMCR})$  احتمال تصادفی یک مقدار از میان مقادیر مجاز هستند. مرحله‌ی تنظیم درجه فقط زمانی که یک مقدار از حافظه‌ی ذرات انتخاب شده باشد، اجرا می‌شود. مقدار  $(1-\text{PAR})$  نشان دهنده‌ی این است که هیچ عملی انجام نشود و مقدار PAR احتمال انتخاب یک مقدار از همسایگی بهترین ذره‌ی بار است.

## ۲-۵-۴- قوانین الگوریتم جستجوی ذرات باردار

**قانون ۱:** CSS یک الگوریتم جمعیت محور است؛ به این معنی که در هر گام تکراری تعداد مشخصی ذرات برای جستجوی دامنه انتخاب می‌شوند. مقدار بار هر ذره و فاصله‌ی بین ذرات از روابط  $(11-2)$  و  $(12-2)$  تعیین می‌شوند.

**قانون ۲:** موقعیت اولیه‌ی ذرات در فضای جستجو بصورت تصادفی از رابطه‌ی  $(7-2)$  و سرعت اولیه‌ی آنها صفر انتخاب می‌شوند.

**قانون ۳:** نیروی الکتریکی بین تمام ذرات بصورت جاذبه فرض شده است. تمام ذرات خوب ذرات بد را جذب می‌کنند و تنها برخی ذرات بد مطابق تابع احتمال  $(11-2)$  توانایی جذب ذرات خوب را دارا می‌باشند. با توجه به حالات گفته شده زمانی که یک ذره‌ی خوب ذره‌ی بد را جذب می‌کند، قابلیت همگرایی الگوریتم فراهم می‌گردد و برعکس در صورتی که یک ذره‌ی بد ذره‌ی خوب را جذب کند توانایی دقت در الگوریتم تقویت می‌گردد. حرکت یک ذره‌ی خوب به سمت یک ذره با کیفیت بد ممکن است سبب از دست رفتن موقعیت خوب قبلی و یا حداقل باعث افزایش هزینه‌ی محاسباتی

جهت پیدا کردن حل مناسب شود. کاربرد حافظه‌ای که در بردارنده‌ی بهترین حل‌ها تا تکرار کنونی باشد، روشی مناسب جهت پیشگیری از وقوع چنین رویدادی است.

**قانون ۴:** مقدار نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره از رابطه‌ی (۲-۸) محاسبه می‌شود.

**قانون ۵:** موقعیت و سرعت جدید ذرات از روابط (۲-۱۵) و (۲-۱۶) بدست می‌آیند.

**قانون ۶:** با استفاده از حافظه‌ی ذرات CM، بهترین بردار ذرات و مقادیر تابع هدف هر یک از

آنها ذخیره می‌شوند. در نظر گرفتن حافظه‌ای که بهترین ذرات همراه با مقادیر توابع شایستگی را

ذخیره سازی می‌کند، بدون افزایش هزینه‌ی محاسباتی بهبود عملکرد الگوریتم را به همراه دارد. مزیت

دیگر این حافظه، هدایت بهتر ذرات باردار در تکرار فعلی است.

**قانون ۷:** ذراتی که از محدوده‌ی مجاز خارج شده‌اند، با استفاده از الگوریتم جستجوی

هارمونیک باز تولید می‌شوند.

**قانون ۸:** الگوریتم تا زمان برقراری معیار توقف تکرار می‌شود.



شکل (۳-۲) فلوجارت الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی ذرات باردار مبتنی بر شبه کد ارائه شده





## **فصل ۳:**

### **اندرکنش پل-خودرو**

### ۳-۱- مقدمه

اندرکنش پل و خودروی در حال حرکت بر روی آن، یک مسئله‌ی دینامیکی غیر خطی است. به طور معمول تمرکز اصلی تحقیقات انجام شده، بر دینامیک و پاسخ ضربه‌ی پل است. در این حالت با صرف نظر از اثر اینرسی خودرو، آنرا به صورت بار متمرکز متحرک عامل تولید ارتعاش در پل تقریب می‌زنیم. چنین مدلی تنها در صورتی که جرم خودرو در قیاس با جرم پل قابل چشم پوشی است و یا تعیین پاسخ‌های خودرو مد نظر نباشد، کارایی خوبی دارد. در اکثر مسائل پیش رو مانند طراحی و یا سلامت‌سنجی پل‌ها و شبکه‌ی راه‌ها نیازمند تحلیل پاسخ‌های دینامیکی خودرو هستیم. به این ترتیب استفاده از مدل‌های دینامیکی پل و خودرو در دهه‌های اخیر کاربرد زیادی یافته است.

روش‌های متفاوتی در تعیین معادلات حرکت سیستم‌های متشکل از چند جسم وجود دارد. از نظر تئوری، دو زیر سیستم<sup>۱</sup> که شامل پل و خودروی متحرک می‌باشد را می‌توان به صورت دو ساختار الاستیک شبیه سازی نمود که هر یک از آنها به کمک فرکانس‌های ارتعاشی قابل شناسایی هستند. این دو زیر سیستم از طریق نیرویی که در نقطه‌ی تماس بین آنها تبادل می‌شود (نیروی اندرکنش)، با یکدیگر در تعامل هستند. با توجه به اینکه دو زیر سیستم در حال حرکت نسبی هستند، موقعیت نیروهای اندرکنشی در طی زمان متغیر و مقادیر آن نیز وابسته به محل قرار گرفتن بار می‌باشد. بنابراین چنین مسائلی غیرخطی هستند و حل آنها مستلزم صرف زمان است. مدل‌سازی و ثبت تمام حرکت‌ها و خصوصیات خودرو در معادلات تحلیلی امری دشوار است. واضح است در نظر گرفتن جزئیات بیشتر منجر به ایجاد مدلی دقیق می‌شود. اما از سوی دیگر، پیچیدگی و افزایش زمان و هزینه‌ی محاسبات را نیز به دنبال خواهد داشت.

در این بخش سعی شده است طی یک رویکرد سیستماتیک، ابتدا به ارائه‌ی یک مدل اندرکنش

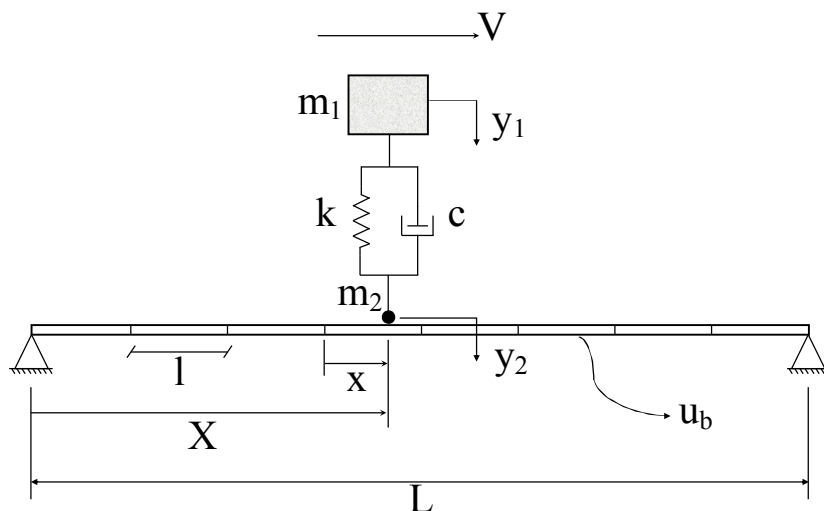
---

<sup>1</sup> Subsystems

پل و خودرو ساده بپردازیم و در ادامه مدل‌های پیچیده‌تر و نزدیک به واقعیت مورد بررسی قرار می‌گیرند. به این ترتیب مدل اول شامل سیستم ساده‌ی پل به صورت تیر الاستیک تحت خودروی تک محوره می‌باشد، سپس سیستم خودروی دو محوره بدون در نظر گرفتن اثر الاستیک تایر خودرو مدل شده است و در نهایت خودروی دو محوره همراه با در نظر گرفتن ویژگی‌های الاستیک تایر خودرو و پروفیل سطح جاده بررسی می‌شود.

### ۲-۳- سازه‌ی پل تحت عبور مدل خودروی تک محوره

جهت بررسی حرکت در راستای قائم خودرو، مدل شناخته شده‌ی دارای دو درجه‌ی آزادی به صورت خودروی تک محوره ارائه شده است. پل مطابق شکل (۱-۳) به صورت تیر ساده تحت سیستم دینامیکی متحرک با سرعت ثابت  $V$  مدل شده است. سیستم متحرک متشکل از دو جرم است. جرم  $m_1$  مربوط به خودرو بوده که بر روی فنر قرار دارد؛ جرم فاقد فنر  $m_2$  نشان دهنده‌ی تایر خودرو می‌باشد و در تماس دائم با پل است.



شکل (۱-۳) پل تحت سیستم متحرک جرم و فنر

معادلات حاکم بر سیستم دینامیکی متحرک و پل با استفاده از فرمول بندی اجزاء محدود

(FEM)<sup>1</sup> به صورت زیر است [۳۶]:

$$m_1 \ddot{y}_1 + c(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k(y_1 - y_2) = 0 \quad (۱-۳)$$

$$[M]\{\ddot{u}_b\} + [C]\{\dot{u}_b\} + [K]\{u_b\} = \{f\} = [N]^T f_0 \quad (۲-۳)$$

$$f_0 = (m_1 + m_2)g - m_2 \ddot{y}_2 + F_T \quad (۳-۳)$$

$$F_T = k(y_1 - y_2) + c(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \quad (۴-۳)$$

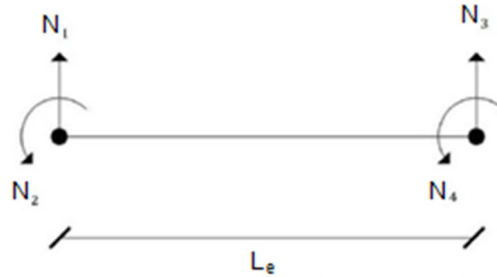
در فرمول (۱-۳) متغیرهای  $y_1$  و  $y_2$  به ترتیب جابجایی‌های قائم جرم‌های  $m_1$  و  $m_2$  هستند.  $k$  و  $c$  میرایی و سختی خودرو می‌باشند. در فرمول (۲-۳) معادلات حاکم بر پل که در تمام مدل‌های ارائه شده در تحقیق حاضر مشترک می‌باشد، از فرمول‌بندی اجزاء محدود بدست آمده است. ماتریس‌های  $[M]$ ،  $[C]$  و  $[K]$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه؛  $[N]$  تابع شکل پل هستند.  $\{u_b\}$ ،  $\{\dot{u}_b\}$  و  $\{\ddot{u}_b\}$  به ترتیب بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب پل،  $F_T$  نیروی اندرکنشی بین پل و سیستم متحرک می‌باشند.

یادآوری می‌شود اجزاء محدود فقط در محل نقاط مرزی با یکدیگر ارتباط دارند. این نقاط برای اجزاء یک بعدی همان نقاط ابتدا و انتهای عضو هستند. در تحلیل سازه‌ها، تغییر مکان‌های گرهی هر جزء به عنوان مجهولات اصلی در نظر گرفته می‌شوند. برای یافتن تغییر مکان سایر نقاط از توابع

---

<sup>1</sup> Finite Element Model

درون یاب هرمیتی<sup>۱</sup> استفاده می شود. جزء تیر خمشی، با دو گره و چهار درجه‌ی آزادی که به فاصله‌ی  $L_e$  در راستای محور طولی از یکدیگر قرار دارند مطابق شکل (۲-۳) می باشد:



شکل (۲-۳) نمایش درجات آزادی تیر ساده برای تحلیل اجزاء محدود

همانگونه که مشاهده می شود، هر گره دارای یک درجه‌ی آزادی انتقالی و یک درجه‌ی آزادی دورانی است.  $L_e$  نیز نشان دهنده‌ی طول جزء می باشد. توابع درون یاب شکل فوق به شرح فرمول (۳-۳) هستند:

$$[N] = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4]$$

$$N_1 = 1 - 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{l}\right)^3, \quad N_2 = x\left(\frac{x}{l} - 1\right)^2, \quad (5-3)$$

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

در فرمول های (۳-۵)،  $l$  طول هر المان پل و  $x$  همان طور که در شکل (۳-۱) مشاهده می شود، مختصات محل قرار گرفتن محور خودروی متحرک در هر ثانیه نسبت به نقطه‌ی ابتدای همان المان می باشد. دقت شود تابع شکل  $[N]$  زیر بردار<sup>۲</sup> غیر صفر  $4 \times 1$  به صورت یک چند جمله‌ای هرمیتی مکعبی وابسته به زمان است که با تغییر موقعیت جرم متحرک در یک المان، هر لحظه مقادیر آن بروز

<sup>1</sup> Hermitian interpolation functions

<sup>2</sup> Sub-vector

رسانی می‌شوند. بردار تابع شکل مربوط به کل سازه‌ی پل که در فرمول (۳-۲) آورده شده است، به این صورت است که برای یک المان پل دارای چهار درجه‌ی آزادی، تعداد داده‌های غیر صفر در یک بردار  $n \times 1$  (  $n$  تعداد کل درجات آزادی پل است) حداکثر برابر چهار خواهد بود و با حرکت جرم متحرک از المانی به المان دیگر مکان ورودی‌های غیر صفر نیز به صورت هماهنگ با محل جدید آن تغییر می‌کنند. با ادغام فرمول‌های (۳-۱) و (۳-۲) از طریق حذف نیروی اندرکنشی بین خودرو و پل، معادله‌ی اندرکنش خودرو-پل به صورت فرمول (۳-۶) حاصل می‌شود [۳۶]:

$$\begin{pmatrix} [M] + [m]^* & \{0\} \\ [0] & m_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{\ddot{u}_b\} \\ \dot{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [C] + [c]^* & -c [N]^T \\ -c [N] & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{u_b\} \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [K] + [k]^* & -k [N]^T \\ -cx [N]_x & -k [N] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{u_b\} \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [N]^T (m_1 + m_2) g \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۳-۶)$$

$$[m]^* = m_2 [N]^T [N] \quad (۳-۷)$$

$$[c]^* = 2m_2 \dot{x} [N]^T [N]_x + c [N]^T [N] \quad (۳-۸)$$

$$[k]^* = m_2 \dot{x}^2 [N]^T [N]_{xx} + m_2 \ddot{x} [N]^T [N]_x + k [N]^T [N] + cx [N]^T [N]_x \quad (۳-۹)$$

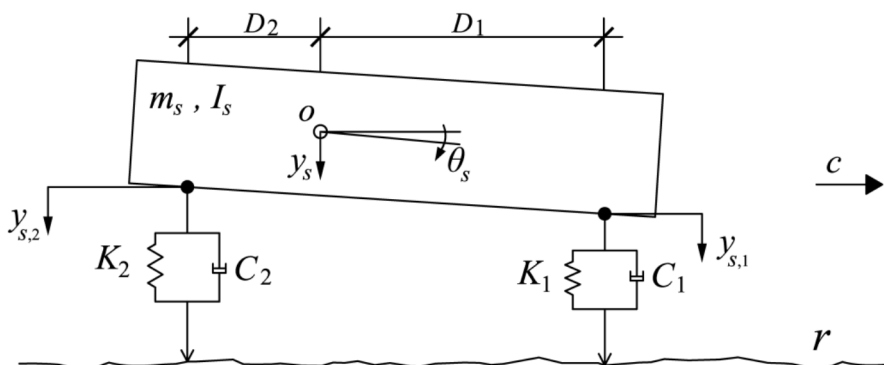
زیرنویس  $x$  در عبارات  $[N]_x$  و  $[N]_{xx}$  نشان دهنده‌ی مشتقات بردار تابع شکل پل نسبت به  $x$  هستند.  $x$  در فرمول‌های (۳-۸) و (۳-۹) موقعیت محور خودرو در هر لحظه نسبت به نقطه‌ی ابتدای پل می‌باشد.

از حل دستگاه فوق به روش ویلسون-تتا<sup>۱</sup>، شتاب قائم ثبت شده توسط شتاب‌سنج خودروی عبوری بدست می‌آید.

### ۳-۳- سازه‌ی پل تحت عبور مدل خودروی دو محوره (جسم صلب)

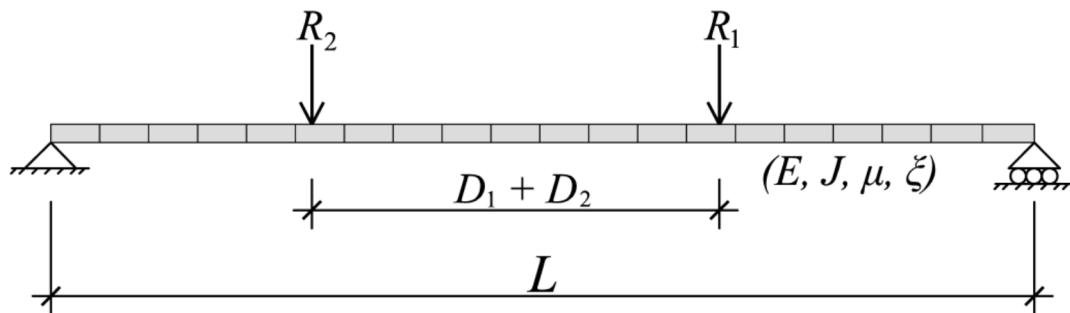
از معایب مدل‌سازی خودرو به صورت تک محوره، چشم‌پوشی از دوران خودرو حول مرکز گرانش آن می‌باشد. با مدل‌سازی خودرو به صورت یک جسم صلب دو محوره، امکان بررسی دوران حول مرکز ثقل فراهم می‌شود. در مدل ارائه شده در این بخش، از سختی الاستیک تاپر خودرو و پروفیل جاده چشم‌پوشی شده است.

سیستم متحرک با سرعت ثابت  $c$  و دو درجه‌ی آزادی تغییر مکان در راستای قائم به صورت  $y_s$  و چرخش حول مرکز ثقل به صورت  $\theta_s$  مطابق شکل (۳-۳) مدل شده است. فرض شده است هر دو محور در تماس دائم با پل قرار دارند.



شکل (۳-۳) مدل خودروی دو محوره

<sup>۱</sup> Wilson-Theta



شکل (۴-۳) پل تحت سیستم خودروی دو محوره

سازه‌ی پل تحت سیستم دینامیکی دو محوره در شکل (۴-۳) نشان داده شده است. در ادامه فرمول‌بندی اجزاء محدود جهت آنالیز مسئله ارائه می‌شود. همانطور که در شکل (۴-۳) مشاهده می‌شود، دو محور بر المان پل قرار دارند. بنابراین نیروهای اثر اندرکنشی دو زیر سیستم شامل خودرو و پل، با استفاده از توابع شکل محاسبه شده در محل‌های معادل با دو محور و مطابق آنچه در بخش قبل مطرح شد، بدست می‌آیند. در حقیقت، اندرکنش پل و خودرو در معادله‌ی حاکم شامل دو جمله خواهد بود که هر یک از آنها معادل سهم هر محور از سیستم متحرک در انتقال نیرو به پل می‌باشد. مسلماً در طی زمان ورود و یا خروج سیستم متحرک، یک بازه‌ی زمانی وجود دارد که تنها یک محور بر روی پل قرار دارد. با توجه به مطالب مذکور، فرمول اندرکنش پل-خودروی دو محوره به صورت زیر می‌باشد [۳۷]:



$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} [M] & \sum_{i=1}^2 [N_i]^T f_{y_i} & \sum_{i=1}^2 [N_i]^T f_{\theta_i} \\ [0] & \mathbf{m}_s & \mathbf{0} \\ [0] & \mathbf{0} & I_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{\ddot{\mathbf{u}}_b\} \\ \ddot{y}_s \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_s \end{pmatrix} \\
& + \begin{pmatrix} [C] & \{\mathbf{0}\} & \{\mathbf{0}\} \\ \sum_{i=1}^2 -c_i [N_i] & \sum_{i=1}^2 c_i & \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} c_i D_i \\ \sum_{i=1}^2 (-1)^i c_i D_i [N_i] & \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} c_i D_i & \sum_{i=1}^2 c_i D_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{\dot{\mathbf{u}}_b\} \\ \dot{y}_s \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_s \end{pmatrix} \\
& + \begin{pmatrix} [K] & \{\mathbf{0}\} & \{\mathbf{0}\} \\ \sum_{i=1}^2 (-c_i x [N_i]_x - k_i [N_i]) & \sum_{i=1}^2 k_i & \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} k_i D_i \\ \sum_{i=1}^2 (-1)^i (D_i c_i x [N_i]_x - b_i k_i [N_i]) & \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} k_i D_i & \sum_{i=1}^2 k_i D_i^2 \end{pmatrix} \quad (10-3) \\
& \times \begin{pmatrix} \{\mathbf{u}_b\} \\ y_s \\ \boldsymbol{\theta}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^2 [N_i]^T f_i \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$f_{y_1} = \frac{D_2}{D_1 + D_2} m_s, \quad f_{y_2} = \frac{D_1}{D_1 + D_2} m_s \quad (11-3)$$

$$f_{\theta_1} = \frac{1}{D_1 + D_2} I_s, \quad f_{\theta_2} = -\frac{1}{D_1 + D_2} I_s \quad (12-3)$$

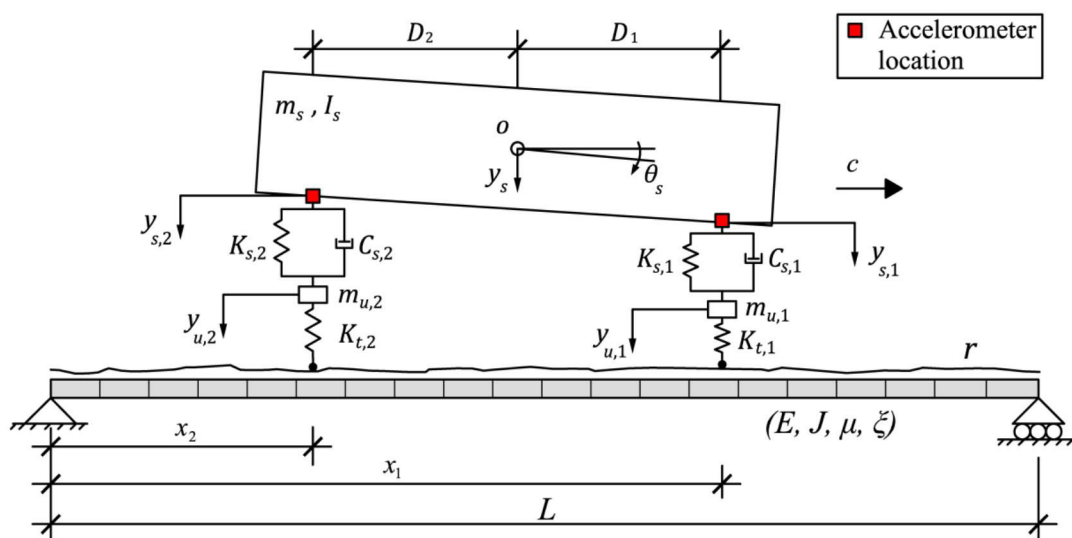
$$f_1 = \frac{D_2}{D_1 + D_2} m_s g, \quad f_2 = \frac{D_1}{D_1 + D_2} m_s g \quad (13-3)$$

$[N_i]$  توابع شکل محاسبه شده در  $x_i, c_i$  و  $k_i$  سختی و میرایی خودرو و  $i = 1, 2$  به ترتیب معادل موقعیت محورهای جلو و عقب سیستم متحرک هستند.  $m_s$  جرم خودرو؛  $I_s$  ممان اینرسی خودرو؛  $y_s$  جابجایی در راستای قائم مرکز جرم خودرو (معادل محل نصب حسگر شتابسنج)؛  $D_i$  فاصله‌ی هر یک از محورها تا مرکز ثقل؛  $\theta_s$  دوران حول مرکز ثقل آن می‌باشند.

از حل دستگاه فوق به روش ویلسون-تتا شتاب قائم ثبت شده توسط شتابسنج خودروی عبوری حاصل می‌شود.

### ۳-۴- سازه‌ی پل تحت عبور مدل خودروی دو محوره با در نظر گرفتن اثر الاستیک تایلر

در مدل خودروی ارائه شده در بخش گذشته، اثرات الاستیک مکانیزم‌های تعلیقی توسط تعدادی فنر و اثرات میرایی آنها توسط تعدادی میراگر مدل‌سازی شده است. در این بخش به بررسی مدلی می‌پردازیم که تطابق بیشتری با مدل حقیقی خودرو دارد و در آن چرخ‌های خودرو به صورت فنرهایی با سختی  $K_{t,i}$  در نظر گرفته شده است. سیستم مذکور در شکل (۳-۵) مشاهده می‌شود. پروفیل راه و ارتعاشات ایجاد شده در پل بر اثر عبور خودرو، دو محرک اصلی ارتعاش خودرو در حال حرکت بر روی پل هستند. در این قسمت اثر پروفیل جاده نیز در مدل لحاظ شده است.



شکل (۳-۵) پل تحت سیستم خودروی دو محوره با در نظر گرفتن اثر الاستیک تایلر و پروفیل جاده

### ۳-۴-۱- مدل‌سازی خودرو

خودرو به صورت جسم صلب دارای تکیه‌گاه شامل مجموعه‌ای از واحدهای میراگر و فنر قرار گرفته بر روی تایلر با سختی فنر  $K_{t,i}$  مدل شده است. ارائه‌ی چنین مدلی شرایط را جهت در نظر گرفتن پروفیل راه فراهم می‌سازد. چهار درجه‌ی آزادی مستقل سیستم شامل جابجایی قائم خودروی

واقع بر روی فنرها ( $y_s$ )؛ دوران حول مرکز جرم خودرو ( $\theta_s$ )؛ جابجایی قائم اجسام فاقد فنر در محوره‌های جلو و عقب خودرو (به ترتیب  $y_{u,1}$  و  $y_{u,2}$ ) می‌باشند. جرم  $m_s$  مربوط به خودرو بوده که بر روی تعدادی فنر قرار دارد. اجرام فاقد فنر  $m_{u,1}$  و  $m_{u,2}$  نشان دهنده‌ی اجزای محوره‌های جلو و عقب می‌باشند. جرم فنری توسط ترکیبی از فنرهای دارای سختی  $K_{s,i}$  و میراگرهای ویسکوز با ضرایب میرایی  $C_{s,i}$  (ارائه دهنده‌ی سیستم‌های تعلیق محوره‌های جلو و عقب خودرو)، به اجرام محورها مرتبط شده است. اجرام محورها نیز از طریق فنرهای دارای سختی  $K_{t,i}$  که نمایانگر سختی تایرهای محور جلو و عقب خودرو می‌باشند، با سطح جاده در ارتباط هستند. سایر پارامترهای مورد توجه ممان اینرسی جرم فنری  $I_s$  و فاصله‌ی مرکز جرم خودرو با هر یک از محوره‌های آن یعنی  $D_1$  و  $D_2$  می‌باشد. معادلات حرکت خودرو با در نظر گرفتن تعادل تمام نیروها و گشتاورهای ایجاد شده در آن به این صورت می‌باشد [۲۸]:

$$[M_v]\{\ddot{y}_v\} + [C_v]\{\dot{y}_v\} + [K_v]\{y_v\} = \{f_v\} \quad (۱۴-۳)$$

$$[M_v] = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{u,1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{u,2} \end{bmatrix} \quad (۱۵-۳)$$

$$[C_v] = \begin{bmatrix} C_{s,1} + C_{s,2} & D_1 C_{s,1} - D_2 C_{s,2} & -C_{s,1} & -C_{s,2} \\ D_1 C_{s,1} - D_2 C_{s,2} & D_1^2 C_{s,1} + D_2^2 C_{s,2} & -D_1 C_{s,1} & D_2 C_{s,2} \\ -C_{s,1} & -D_1 C_{s,1} & C_{s,1} & 0 \\ -C_{s,2} & D_2 C_{s,2} & 0 & C_{s,2} \end{bmatrix} \quad (۱۶-۳)$$

$$[K_v] = \begin{bmatrix} K_{s,1} + K_{s,2} & D_1 K_{s,1} - D_2 K_{s,2} & -K_{s,1} & -K_{s,2} \\ D_1 K_{s,1} - D_2 K_{s,2} & D_1^2 K_{s,1} + D_2^2 K_{s,2} & -D_1 K_{s,1} & D_2 K_{s,2} \\ -K_{s,1} & -D_1 K_{s,1} & K_{s,1} & 0 \\ -K_{s,2} & D_2 K_{s,2} & 0 & K_{s,2} \end{bmatrix} \quad (17-3)$$

$$\{y_v\} = \{y_s, \theta_s, y_{u,1}, y_{u,2}\}^T \quad (18-3)$$

بردار  $\{f_v\}$  نشان دهنده نیروهای اندرکنشی بین تایرهای خودرو و پل بوده و از فرمول (19-3) محاسبه می‌شود:

$$\{f_v\} = \{0 \quad 0 \quad -F_{t,1} \quad -F_{t,2}\}^T \quad (19-3)$$

جمله‌ی  $F_{t,i}$  نیروی دینامیکی انتقال یافته از طریق تایرها می‌باشد:

$$F_{t,i} = K_{t,i} (y_{u,i} - w_{v,i}); \quad i = 1, 2 \quad (20-3)$$

$w_{v,i}$  جابجایی کل در زیر تایر  $i$  می‌باشد. این پارامتر را به صورت ترکیبی از جابجایی پروفیل جاده  $r_i$  و جابجایی پل در زیر چرخ  $i$  یعنی  $w_{b,i}$  بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$w_{v,i} = w_{b,i} + r_i; \quad i = 1, 2 \quad (21-3)$$

### ۳-۴-۲- مدل سازی پروفیل

کیفیت سطح پروفیل جاده‌ها می‌تواند بسیار متنوع باشد. تلاش زیادی جهت ارائه‌ی روش مناسب تقسیم‌بندی پروفیل جاده انجام شده است. دو روش شناخته شده جهت این تقسیم‌بندی

شامل روش سازمان بین المللی استاندارد (ISO)<sup>۱</sup> و شاخص بین المللی زبری (IRI)<sup>۲</sup> می‌باشند.

IRI عمدتاً در آمریکا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص به صورت یک عدد با واحدهای شیب گزارش می‌شود. نحوه‌ی محاسبه‌ی این شاخص به صورت مجموع تغییر مکان‌های در راستای قائم خودرو بر کل مسافت طی شده می‌باشد.

در روش ISO از طیف تراکم توان (PSD)<sup>۳</sup> و فرکانس فضایی<sup>۴</sup> جهت تقسیم‌بندی پروفیل راه استفاده می‌شود. در این روش هشت گروه با شاخص‌های A تا H در نظر گرفته شده است. کلاس A مربوط به پروفیل‌های دارای بهترین کیفیت و کمترین زبری می‌باشد. در نقطه‌ی مقابل کلاس H مربوط به جاده با پروفیل بسیار زبر می‌باشد. در تحقیق حاضر روش ISO مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳-۴-۳- مدل سازی پل

پل به صورت تیر اجزاء محدود مدل شده است. پل به تعدادی المان مجزا تقسیم شده است و هر گره آن دارای دو درجه‌ی آزادی حرکت در راستای قائم و دوران می‌باشد. معادله‌ی حاکم بر آن به صورت زیر می‌باشد [۲۸]:

$$[M_b]\{\ddot{W}_b\} + [C_b]\{\dot{W}_b\} + [K_b]\{W_b\} = [N_b]\{f_{int}\} \quad (۲۲-۳)$$

$[M_b]$  و  $[C_b]$  و  $[K_b]$  به ترتیب ماتریس‌های جرم میرایی و سختی پل؛  $\{W_b\}$ ،  $\{\dot{W}_b\}$  و  $\{\ddot{W}_b\}$  بردارهای تغییر مکان قائم و دوران، سرعت و شتاب آنها که در تمام گره‌های المان‌های پل محاسبه

---

<sup>1</sup> International Standards Organization  
<sup>2</sup> International Roughness Index  
<sup>3</sup> Power Spectral Density  
<sup>4</sup> Spatial frequency

شده، هستند.  $[N_b] \{f_{int}\}$  بردار نیروی وارد شده بر تمام گره‌های پل است. بردار  $\{f_{int}\}$  شامل نیروی اندرکنشی بین خودرو و پل می‌باشد و نحوه‌ی محاسبه‌ی ماتریس شکل  $[N_b]$  مشابه توضیحات ارائه شده در دو بخش قبلی است.

$$\{f_{int}\} = \begin{Bmatrix} P_1 + F_{t,1} \\ P_2 + F_{t,2} \end{Bmatrix} \quad (23-3)$$

$$[N_b] = [[N_1] \quad [N_2]]_{n \times 2} \quad (24-3)$$

با استفاده از ماتریس شکل، تغییر مکان پل در زیر هر یک از تایرها را محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{Bmatrix} w_{b,1} \\ w_{b,2} \end{Bmatrix} = [N_b]^T \{W_b\} \quad (25-3)$$

جهت مدل‌سازی میرایی ویسکوز، از میرایی رایلی استفاده شده است:

$$[C_b] = \alpha [M_b] + \beta [K_b] \quad (26-3)$$

$\alpha$  و  $\beta$  مقادیری ثابت هستند و از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$\alpha = 2\xi\omega_1\omega_2 / (\omega_1 + \omega_2), \quad \beta = 2\xi / (\omega_1 + \omega_2) \quad (27-3)$$

جمله‌های  $\omega_1$  و  $\omega_2$  دو فرکانس اول اصلی تیر هستند.

### ۳-۴-۴- معادلات همبست پل-خودرو

پل و خودرو در نقاط تماس تایر، با یکدیگر تبادل نیرو دارند.  $\{f_{int}\}$  در معادله‌ی (۲۳-۳) محاسبه شد. با تلفیق معادلات (۱۴-۳) و (۲۲-۳)، معادله‌ی اندرکنش پل و خودرو بدست می‌آید

: [۲۸]

$$[M_g]\{\ddot{u}\} + [C_g]\{\dot{u}\} + [K_g]\{u\} = \{f\} \quad (۲۸-۳)$$

$[M_g]$  و  $[C_g]$  به ترتیب ماتریس‌های همبست جرم و میرایی سیستم هستند. ماتریس  $[K_g]$  سختی وابسته به زمان همبست و  $\{f\}$  بردار نیروی سیستم می‌باشند. بردار  $\{u\} = \{y_v, W_b\}^T$  جابجایی سیستم می‌باشد.

$$[M_g] = \begin{bmatrix} [M_v] & [0] \\ [0] & [M_b] \end{bmatrix} \quad (۲۹-۳)$$

$$[C_g] = \begin{bmatrix} [C_v] & [0] \\ [0] & [C_b] \end{bmatrix} \quad (۳۰-۳)$$

$$[K_g] = \begin{bmatrix} [K_{vv}] & [K_{vb}] \\ [K_{bv}] & [K_b] + [K_{bb}] \end{bmatrix} \quad (۳۱-۳)$$

$$[K_{vv}] = \begin{bmatrix} K_{s,1} + K_{s,2} & D_1 K_{s,1} - D_2 K_{s,2} & -K_{s,1} & -K_{s,2} \\ D_1 K_{s,1} - D_2 K_{s,2} & D_1^2 K_{s,1} + D_2^2 K_{s,2} & -D_1 K_{s,1} & D_2 K_{s,2} \\ -K_{s,1} & -D_1 K_{s,1} & K_{s,1} + K_{t,1} & 0 \\ -K_{s,2} & D_2 K_{s,2} & 0 & K_{s,2} + K_{t,2} \end{bmatrix} \quad (۳۲-۳)$$

$$[K_{bv}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -[N_b] \begin{bmatrix} K_{t,1} & 0 \\ 0 & K_{t,2} \end{bmatrix} \end{bmatrix}_{n \times 4}, \quad [K_{vb}] = [K_{bv}]^T \quad (۳۳-۳)$$



$$[K_{bb}] = \left[ [N_b] \left[ [N_b] \begin{bmatrix} K_{t,1} & 0 \\ 0 & K_{t,2} \end{bmatrix} \right]^T \right]_{n \times n} \quad (34-3)$$

$$\{f\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ K_{t,1}r_1 \\ [N_b] \begin{Bmatrix} P_1 - K_{t,1}r_1 \\ P_2 - K_{t,2}r_2 \end{Bmatrix} \end{array} \right\} \quad (35-3)$$

معادلات همبست سیستم به روش ویلسون-تتا حل شد. مقدار بهینه  $\theta = 1.420815$  انتخاب شد.

در این مدل سازی مطابق شکل (3-3) دو حسگر ثبت شتاب خودرو که با نقاط قرمز رنگ مشخص شده است، در محل تلاقی محورها و جسم صلب خودرو نصب شده است که پاسخهای آنها از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [28]:

$$\ddot{y}_{s,i} = \ddot{y}_s - (-1)^i D_i \ddot{\theta}_s; \quad i = 1, 2 \quad (36-3)$$

### 3-5- تعیین فرکانس‌های اصلی پل و خودرو به کمک سیگنال‌های شتاب خودرو

فرکانس حرکت خودرو، فرکانس طبیعی آن و فرکانس طبیعی پل فاکتورهای اصلی مشارکت کننده در ارتعاش خودروی در حال عبور از روی پل هستند. به روش تئوریک فرمول‌های (3-37)، (3-38) و (3-39) جهت محاسبه‌ی هر یک از فرکانس‌های مذکور وجود دارد.

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (37-3)$$

$$\eta = \pi v / L \quad (38-3)$$

$$\omega_v = \sqrt{\frac{k_v}{m_v}} \quad (39-3)$$

رابطه‌ی (۳۷-۳) در شرایطی که  $EI$  در تمام المان‌ها یکسان و یا به عبارت دیگر پل سالم باشد، جهت محاسبه‌ی فرکانس‌های اصلی پل بکار می‌رود.  $EI$  سختی،  $L$  طول و  $m$  جرم در واحد طول پل و  $n$  شماره‌ی فرکانس اصلی پل هستند. رابطه‌ی (۳۸-۳) فرکانس حرکت خودرو و رابطه‌ی (۳۹-۳) فرکانس خودرو می‌باشند.  $k_v$  و  $m_v$  جرم و سختی خودرو و  $v$  سرعت حرکت آن هستند.

روشی دیگر که حتی در صورت وجود المان آسیب دیده در پل می‌توان بکار برد، استفاده از روابط دینامیکی تحلیل دینامیکی سازه می‌باشد. در این روابط می‌توان از ماتریس‌های  $[M]$  و  $[K]$  که ماتریس‌های سختی و جرم سازه می‌باشند، به فرکانس‌های اصلی سازه دست یافت.

در روشی دیگر از شتاب خودروی عبوری جهت شناسایی فرکانس‌های اصلی پل و خودرو استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه سیگنال بدست آمده از خودرو، هم‌زمان شامل پاسخ‌های خودرو و به صورت غیر مستقیم (به علت وجود اندرکنش بین پل و خودرو) شامل پاسخ‌های پل نیز می‌باشد، بنابراین با استفاده از تبدیل فوریه‌ی سریع (FFT)<sup>۱</sup> به فرکانس‌های پل و خودرو دست پیدا می‌کنیم. مطالعات تحلیلی حاکی است که در پاسخ شتاب، چهار فرکانس غالب قابل مشاهده است که شامل فرکانس خودرو  $\omega_v$ ، فرکانس حرکت خودرو  $\eta$ ، دو فرکانس انتقال یافته‌ی پل  $\omega_b \pm \frac{\pi v}{L}$  می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Fast Fourier Transform

## **فصل ۴:**

### **مدل سازی عددی**

در این فصل سه مدل اندرکنش پل-خودرو که در فصل گذشته به معرفی آنها پرداخته شد، در قالب چند مثال مورد بررسی قرار گرفته است تا به برآورد مشخصات پل و پاسخ‌های دینامیکی پل و خودروی عبوری بپردازیم. در تمام مثال‌ها روند مشخصی به این شرح طی شده است. نخست مدل‌سازی اندرکنش پل و خودرو برای یک پل سالم در نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> انجام شده است و به استخراج پاسخ‌های پل و خودرو برای پل سالم پرداخته‌ایم. سپس شتاب‌های استخراج شده از خودروی عبوری و برخی ویژگی‌های پل و خودرو به عنوان داده‌ها، سختی پل و برخی پارامترهای خودرو (بسته به مسئله‌ی مورد بررسی)، به عنوان مجهولات در نظر گرفته شده است و سعی شده است طی یک روند مهندسی معکوس و به کمک الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی ذرات باردار به برآورد مجهولات مسئله بپردازیم. در نهایت با توجه به اینکه رویداد آسیب سبب ایجاد تغییر در ویژگی‌های دینامیکی و فیزیکی سازه می‌شود، آسیب در پل‌های مورد بررسی به صورت کاهش سختی یکی از المان‌های پل مدل شده است. برای حل این مسئله نیز ابتدا مدل‌سازی اندرکنش پل و خودرو برای پل آسیب دیده انجام و پاسخ‌های پل و خودرو استخراج شده است. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی و با در دست بودن شتاب‌های خودرو، به تخمین سختی المان‌های پل پرداخته شده است. نتایج حاکی است تخمین محل و میزان آسیب به روش مذکور با دقت خوبی امکان‌پذیر است.

در تمام مسائل این فصل، تابع هدف (تابع شایستگی) در الگوریتم بهینه‌یابی به صورت کمینه کردن قدر مطلق اختلاف شتاب خودرو که از ابتدا در دست است با شتاب‌هایی که در هر مرحله‌ی تکرار الگوریتم بهینه‌یابی به ازای مقادیر حدسی برای مجهولات مسئله بدست می‌آید، تعریف شده

---

<sup>1</sup> Matlab

است و به صورت رابطه‌ی (۱-۴) تعریف می‌شود:

$$\text{Min} = \sum_{i=1}^n \left( a_{vehSen,i} - a_{vehAlg,i} \right)^2 \quad (1-4)$$

در رابطه‌ی فوق  $a_{vehSen,i}$  شتابی است که از مدل‌سازی اندرکنش پل-خودرو برای هر یک از شتاب‌سنج‌ها بدست می‌آید و  $a_{vehAlg,i}$  شتابی است که در هر تکرار، الگوریتم برای شتاب‌های ثبت شده توسط هر شتاب‌سنج خودرو تخمین زده است.  $n$  تعداد کل شتاب‌سنج‌های نصب شده بر روی خودرو است. الگوریتم بهینه‌یابی در جهت کمینه‌سازی تابع هدف پیش می‌رود. معیار توقف، به صورت توقف پس از تعداد دفعات تکرار مشخص شده می‌باشد.

#### ۴-۲- آنالیز نمونه‌های اندرکنش پل-خودروی تک محوره

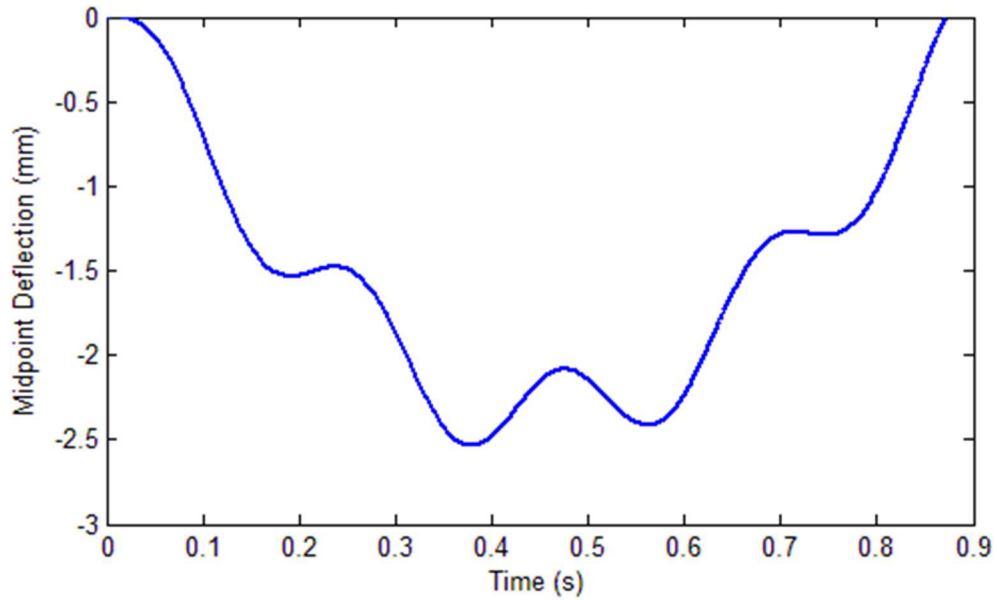
پل تحت عبور خودروی مجهز به حسگر شتاب‌سنج مطابق شکل (۱-۳) مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد المان‌ها ۱۰ و گام‌های زمانی ۰.۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. در این مدل‌سازی مشخصات پل و خودروی عبوری به شرح جدول هستند:

جدول (۱-۴) پارامترهای پل و مجموعه‌ی جرم-فتر مدل‌سازی شده (اندرکنش پل-خودروی تک محوره)

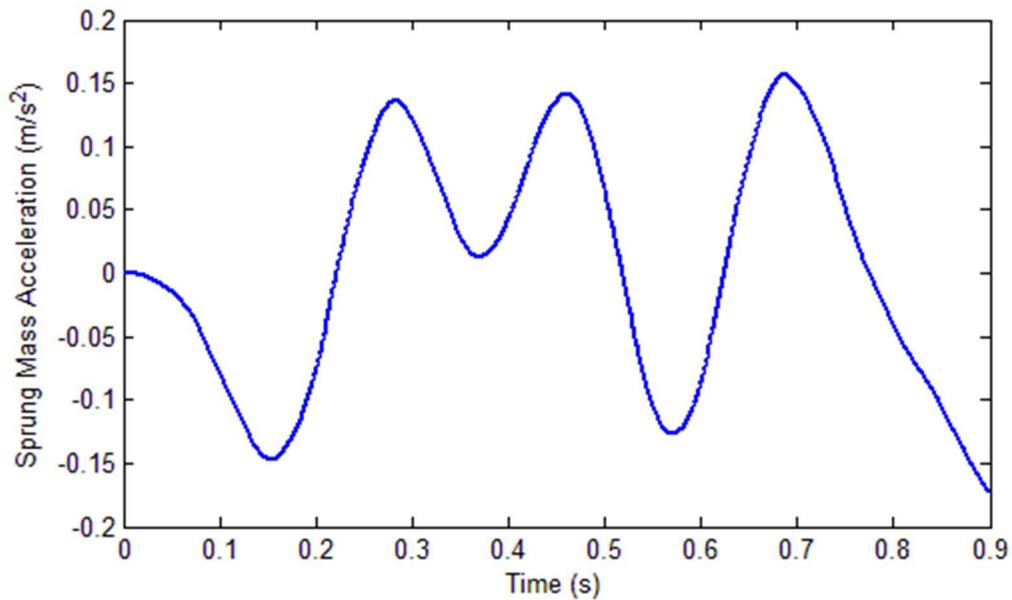
$M_v = 5750 \text{ Kg}$	جرم بدنه‌ی خودرو	$L = 25 \text{ m}$	طول پل
$M_w = 0 \text{ Kg}$	جرم چرخ‌های خودرو	$M = 2303 \text{ Kg/m}$	جرم بر واحد طول
$K_v = 1595 \text{ KN/m}$	سختی خودرو	$V = 100 \text{ Km/hr}$	سرعت خودرو
$C_v = 0 \text{ N.s/m}$	میرایی خودرو	$EI = 8.32e+9 \text{ N.m}^2$	سختی المان‌های سالم

مثال ۱: مدل‌سازی روابط اندرکنش پل-خودرو انجام شده است. پاسخ‌های پل و خودرو در

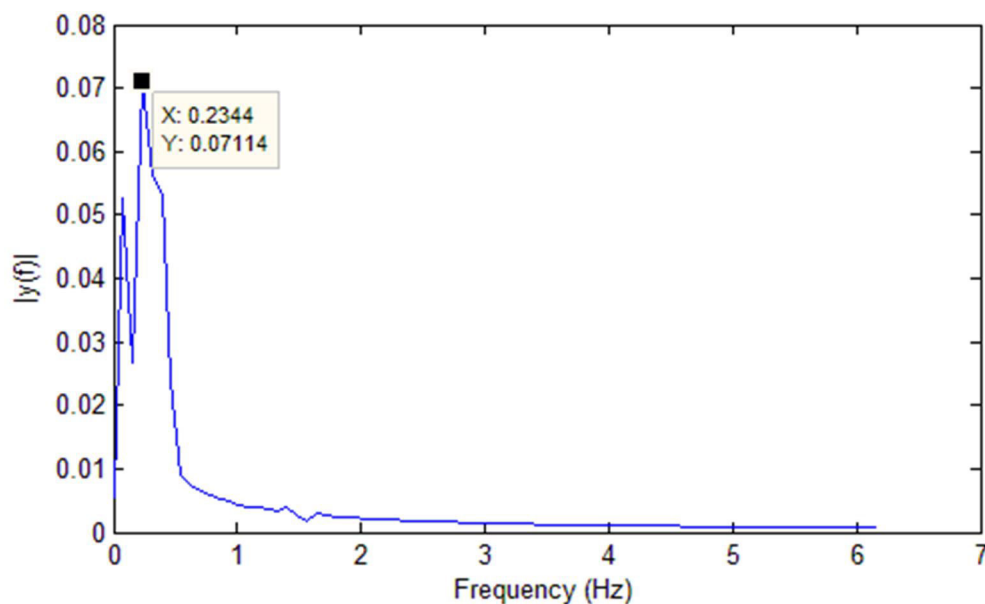
نمودارهای زیر قابل مشاهده هستند که در تطابق خوبی با نتایج [۳۶] قرار دارند:



شکل (۱-۴) تغییر شکل قائم نقطه‌ی وسط پل (مدل اندرکنش پل-خودروی تک محوره)



شکل (۲-۴) شتاب قائم خودرو (مدل اندرکنش پل-خودروی تک محوره)



شکل (۳-۴) اعمال FFT بر شتاب خودرو (مدل اندرکنش پل خودروی تک محوره)

**مثال ۲:** در این مسئله پاسخ‌های سیگنال شتاب بدست آمده از مدل‌سازی اندرکنش پل -

خودروی تک محوره به عنوان داده‌ها و سختی پل EI، به عنوان مجهول در نظر گرفته شده است.

مقادیر تابع شایستگی الگوریتم در هر تکرار در شکل (۴-۴) قابل مشاهده است. در تکرارهای

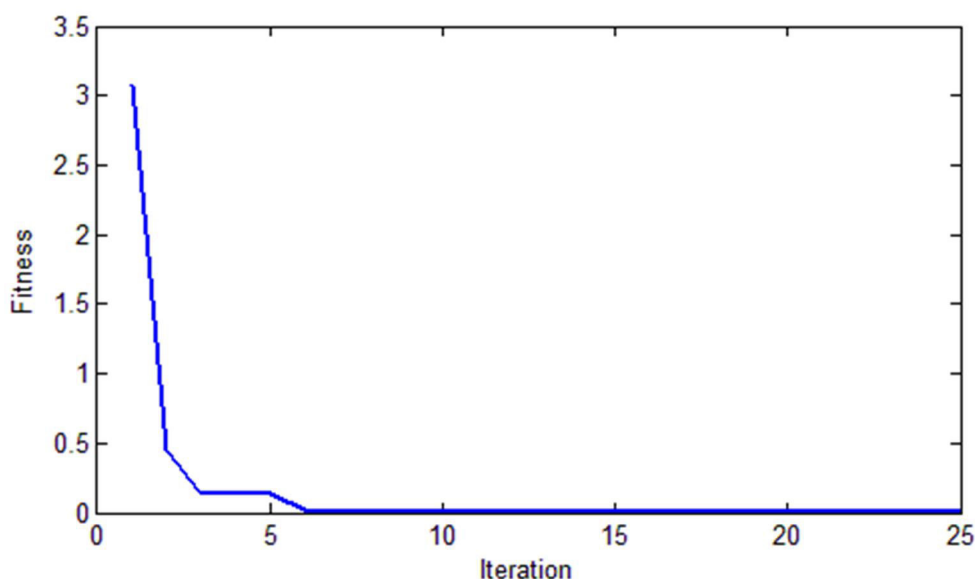
اولیه شاهد اکتشاف در فضای مجاز جستجو هستیم و در تکرارهای بعدی، پس از شناسایی فضایی که

احتمال حضور پاسخ در آن بیشتر است، عمدتاً شاهد همگرایی و استخراج پاسخ خواهیم بود. در

مراحل استخراج پاسخ، تغییر محسوسی در پاسخ ایجاد نمی‌شود بلکه پیوسته پاسخ بهبود یافته است.

سختی المان‌های پل  $8.323e+9$  است و الگوریتم مقدار  $8.3289e+9$  را تخمین زده است. درصد خطا

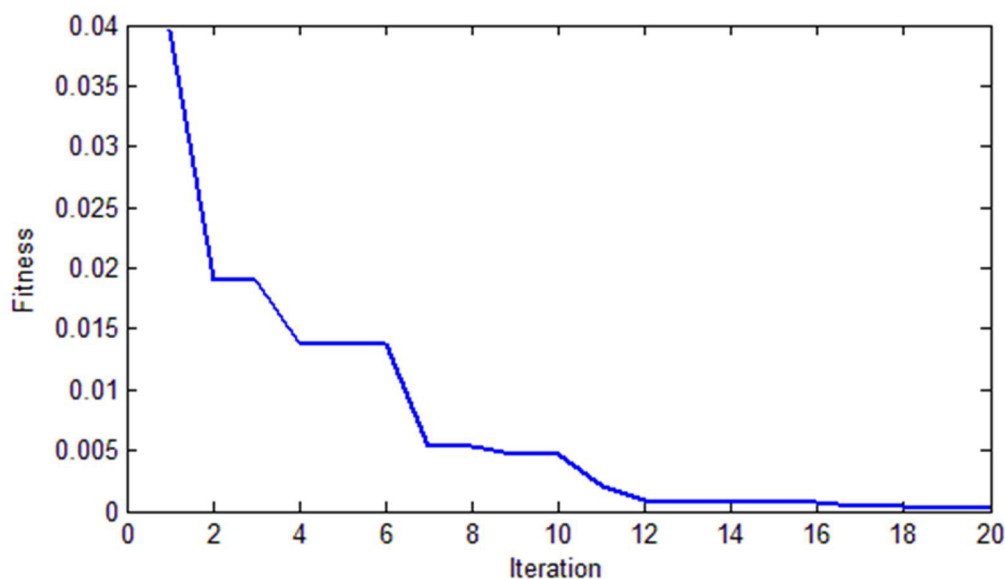
معادل 0.07% است که نشان می‌دهد الگوریتم در شناسایی متغیر مسئله موفق است.



شکل (۴-۴) نمودار همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی تک محوره (مجهول مسئله: سختی پل)

**مثال ۳:** در این مسئله فرض شده است اطلاعاتی از سختی‌المان‌های پل و نیز جرم و سختی خودرو در دست نمی‌باشد. می‌خواهیم با استفاده از سیگنال شتاب خودرو، به تعیین پارامترهای مجهول بپردازیم. با توجه به اینکه کالیبره کردن مشخصات خودرو یکی از چالش‌های پیش رو در شناسایی پارامترهای دینامیکی پل است، در این مسئله سختی و جرم خودرو نیز علاوه بر سختی پل به عنوان مجهولات مطرح شده است. نمودار همگرایی الگوریتم در شکل (۴-۵) قابل مشاهده است. سختی‌المان‌های پل  $8.323e+9 \text{ N.m}^2$ ، جرم خودرو  $5750 \text{ Kg}$  و سختی خودرو  $1595 \text{ KN/m}$  هستند. سختی‌المان‌ها  $8.32765e+9 \text{ N.m}^2$ ، جرم خودرو  $5729.12 \text{ Kg}$  و سختی خودرو  $1591.74 \text{ KN/m}$  توسط الگوریتم تعیین شده است.



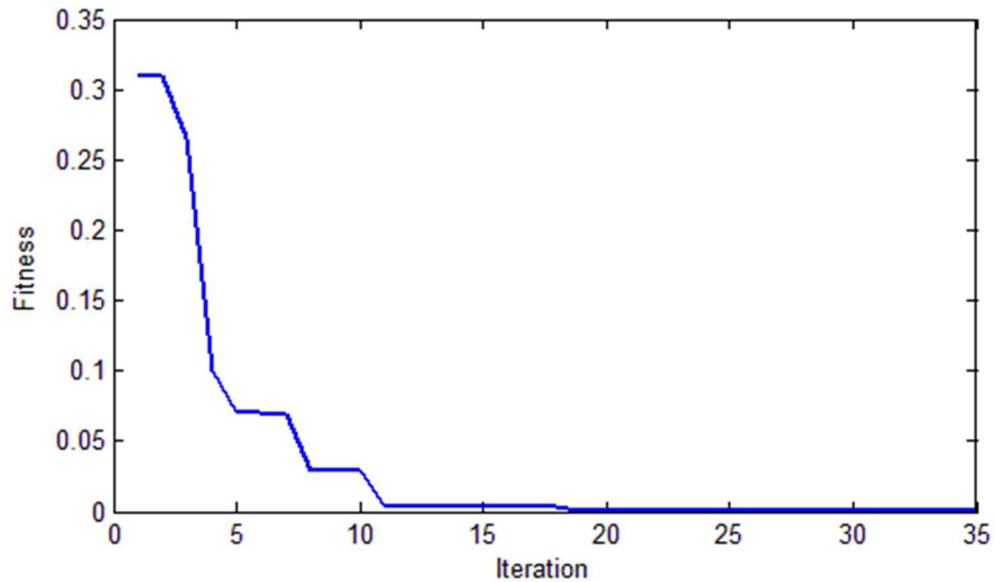


شکل (۴-۵) نمودار همگرایی الگوریتم خودروی تک محوره (مجهولات: جرم و سختی خودرو، سختی پل)

**مثال ۴:** در این مسئله مدل سازی کمی متفاوت است و شاهد رویداد آسیب در پل هستیم.

یکی از پارامترهایی که در اثر رویداد آسیب در پل دچار تغییر می شود، سختی المان ها است. بنابراین سختی المان های پل شاخص مناسبی جهت سلامت سنجی آن است. در این مثال سختی المان هفتم به میزان 33% کاهش پیدا کرده است. سه متغیر جهت بهینه یابی تعریف شده است. اولین متغیر سختی المان های سالم، متغیر بعدی سختی المان آسیب دیده و آخرین متغیر نیز شماره ی المان آسیب دیده، هستند. در این میان متغیرهای مربوط به سختی المان های آسیب دیده و سالم، می توانند هر مقداری در بازه ی مجاز را اختیار کنند و متغیرهای پیوسته هستند. متغیر تعیین شماره ی المان آسیب دیده که عددی صحیح در بازه ی یک تا ده می باشد، گسسته است. مراحل طی شده به این صورت است که ابتدا پاسخ های شتاب خودرو از اندرکنش پل-خودرو که در متلب مدل سازی شده است، برای پل دارای مشخصات جدید (سختی المان های آن متفاوت با مسائل پیشین است) محاسبه می شود. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه یابی سعی شده است به تخمین سختی المان ها بپردازیم. نمودار همگرایی الگوریتم در شکل (۴-۶) مشاهده می شود. سختی المان های سالم پل  $8.323e+9$   $N.m^2$ ، سختی المان آسیب دیده  $5.5487$   $N.m^2$  هستند. نتایج حاکی است که الگوریتم محل المان

آسیب دیده را به درستی شناسایی می‌کند. سختی المان‌های سالم  $8.323 \times 10^9 \text{ N.m}^2$  و سختی المان آسیب دیده  $5.5486 \text{ N.m}^2$  توسط الگوریتم تعیین شده‌اند که نشان دهنده‌ی کارایی خوب روش بکار رفته است.

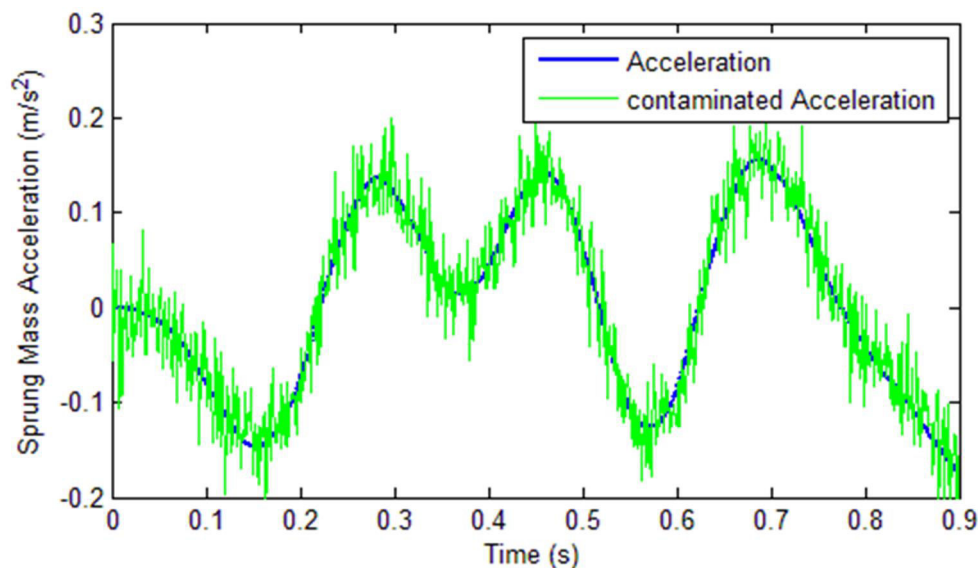


شکل (۴-۶) همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل خودروی تک محوره (مجهولات: سختی المان‌های پل آسیب دیده)

**مثال ۵:** در آخرین مسئله‌ی مدل‌سازی اندرکنش پل خودروی تک محوره، مشخصات خودرو

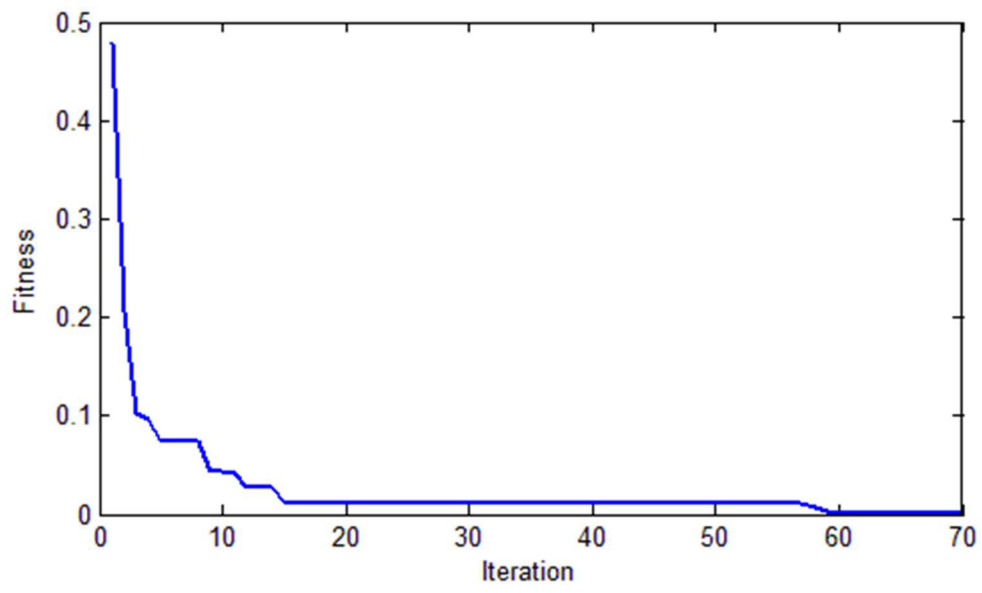
مجهول هستند و سختی یک المان پل به میزان 25% کاهش یافته است. این مسئله شامل پنج متغیر است. دو متغیر پیوسته مربوط به خودرو، دو متغیر پیوسته و یک متغیر گسسته (شماره‌ی المان آسیب دیده) مربوط به پل هستند. یک نویز سفید گوسی با نسبت سیگنال به نویز (SNR)<sup>۱</sup> برابر با 10 به سیگنال اعمال و سپس با روش فیلترگذاری میانگین متحرک، نویز ایجاد شده حذف گردیده است. در شکل (۴-۷) تغییرات ایجاد شده در سیگنال شتاب خودرو نمایش داده شده است.

<sup>۱</sup> Signal to Noise Ratio



شکل (۴-۷) شتاب قائم خودرو زمانی که نویز به آن اعمال شود برای اندرکنش پل-خودروی تک محوره (مجهولات: سختی المان‌های پل آسیب دیده، جرم و سختی خودرو)

علی‌رغم پیچیدگی مسئله ناشی از تعداد زیاد متغیرها، پیچیدگی مدل ریاضی و نویز اعمال شده به سیگنال شتاب، امکان تخمین مقادیر صحیح تمام پارامترها با دقت خوبی توسط الگوریتم وجود دارد. در شکل (۴-۸) نحوه‌ی همگرایی الگوریتم مشاهده می‌شود. سختی المان‌های سالم پل خودرو  $8.323e+9 \text{ N.m}^2$ ، سختی المان دچار آسیب  $6.24225e+9 \text{ N.m}^2$ ، جرم خودرو  $5750 \text{ Kg}$  و سختی خودرو  $1595 \text{ KN/m}$  هستند. سختی المان‌های سالم  $8.32765e+9 \text{ N.m}^2$ ، سختی المان دچار آسیب  $6.22971e+9 \text{ N.m}^2$ ، جرم خودرو  $5757.5 \text{ Kg}$  و سختی خودرو  $1596.16 \text{ KN/m}$  توسط الگوریتم محاسبه شده است.



شکل (۴-۸) همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی تک محوره (مجهولات: جرم و سختی خودرو، سختی پل آسیب دیده)

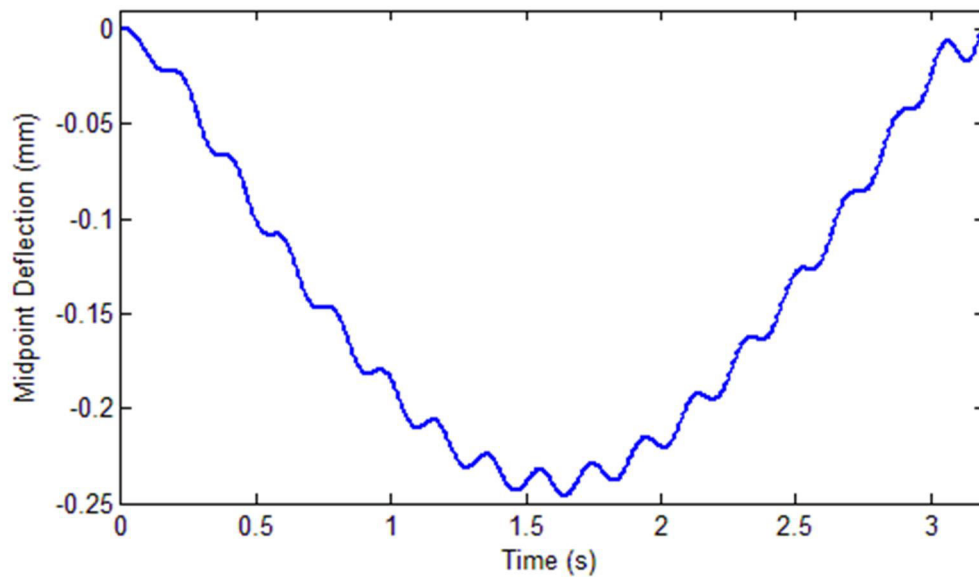
### ۳-۴- آنالیز نمونه‌های اندرکنش پل-خودروی دو محوره (جسم صلب)

در این بخش نمونه‌هایی از دومین مدل اندرکنش پل-خودرو که در فصل قبل مطرح شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات پل و خودروی عبوری مطابق جدول هستند [۳۷].

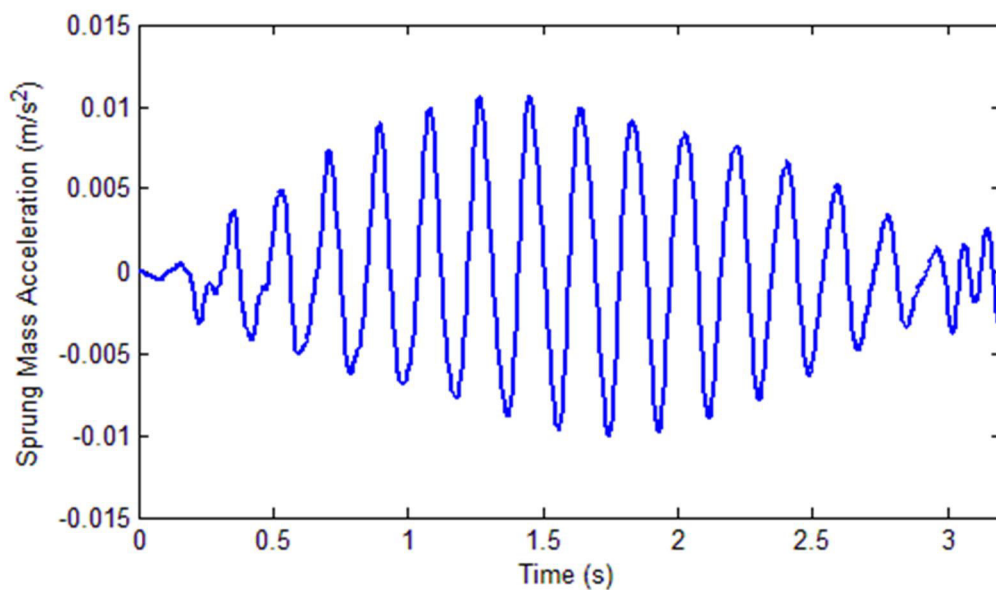
جدول (۲-۴) پارامترهای پل و مجموعه‌ی جرم-فنر (اندرکنش پل-خودروی دو محوره)

$M_v = 2000 \text{ Kg}$	جرم بدنه‌ی خودرو	$L = 30 \text{ m}$	طول پل
$M_w = 0 \text{ Kg}$	جرم چرخ‌های خودرو	$M = 4800 \text{ Kg/m}$	جرم بر واحد طول
$K_v = 5000 \text{ KN/m}$	سختی هر محور خودرو	$V = 10 \text{ m/s}$	سرعت خودرو
$C_v = 0 \text{ N.s/m}$	میرایی هر محور خودرو	$EI = 4.58e+10 \text{ N.m}^2$	سختی المان‌های سالم
$J = 2500 \text{ Kg.m}^2$	ممان اینرسی خودرو	$D_1, D_2 = 1 \text{ m}$	فاصله‌ی مرکز جرم تا هر محور
$\omega_1 = 5.39 \text{ Hz}$	اولین فرکانس اصلی پل	$\eta = 0.33 \text{ Hz}$	فرکانس حرکت خودرو
$\omega_2 = 21.56 \text{ Hz}$	دومین فرکانس اصلی پل	$\omega_v = 11.25 \text{ Hz}$	فرکانس خودرو

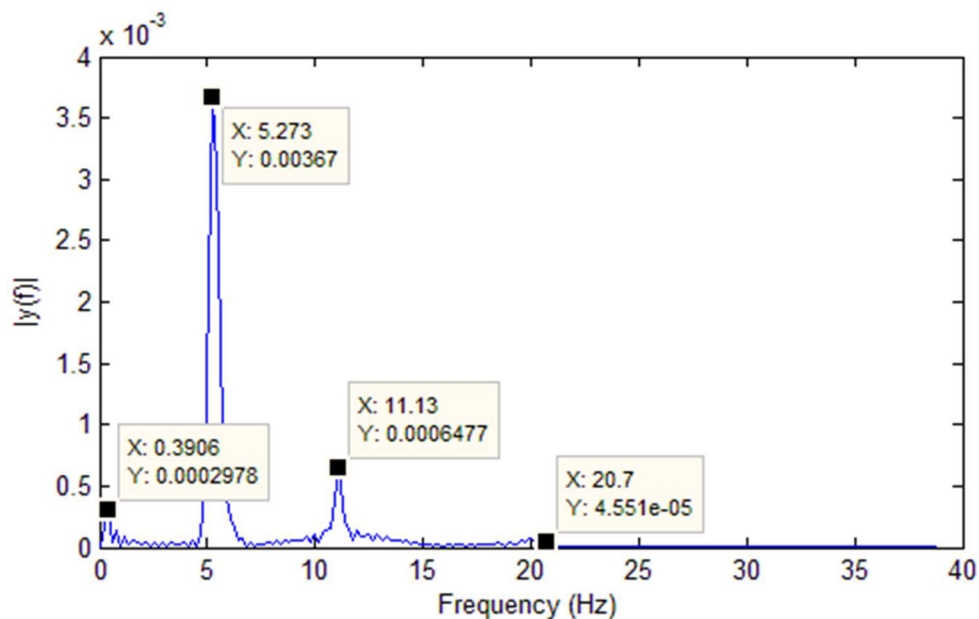
**مثال ۶:** در این مثال، مدل سازی اندرکنش پل-خودروی دو محوره انجام شده است. نمودارهای جابجایی نقطه‌ی وسط تیر، سیگنال‌های شتاب خودروی عبوری و نمودار FFT برای شتاب‌های خودرو مشاهده می‌شوند.



شکل (۹-۴) تغییر شکل قائم نقطه‌ی وسط پل (مدل اندرکنش پل-خودروی دو محوره)



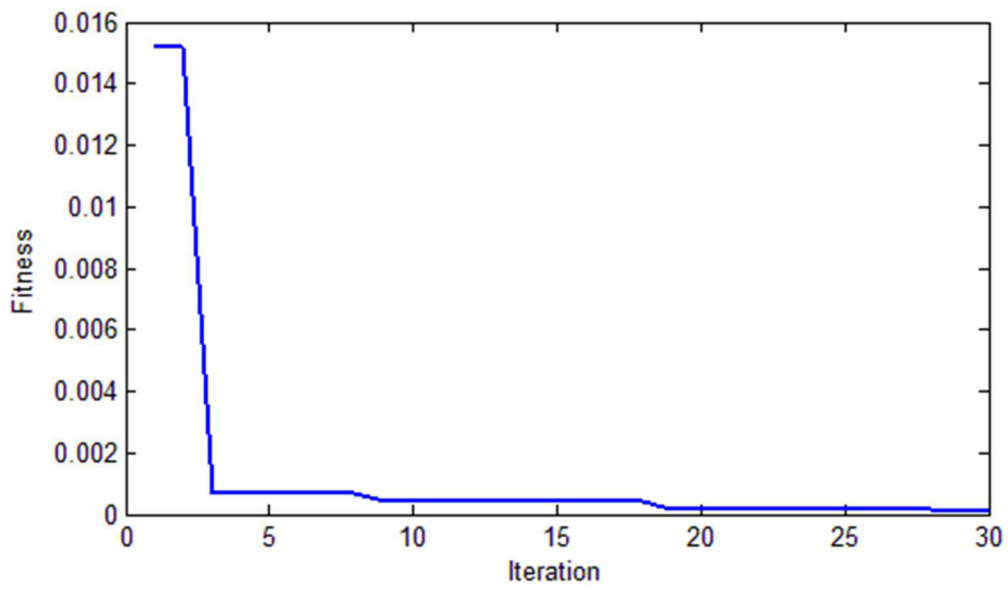
شکل (۱۰-۴) شتاب قائم خودرو (مدل اندرکنش پل-خودروی دو محوره)



شکل (۴-۱۱) اعمال FFT بر شتاب خودرو (مدل اندرکنش پل-خودروی تک محوره)

فرکانس‌های پل و خودرو که از روابط فصل قبل محاسبه شد، در جدول (۴-۲) ارائه شده است. مطابق شکل (۴-۱۱) این فرکانس‌ها از اعمال FFT بر شتاب خودرو با دقت خوبی قابل محاسبه هستند که نشان می‌دهد مدل‌سازی به خوبی انجام شده است.

**مثال ۷:** در این مسئله، پاسخ‌های شتاب خودرو داده‌های الگوریتم بهینه‌یابی و سختی المان‌های پل متغیرهای مجهول می‌باشند. نمودار همگرایی الگوریتم در شکل (۴-۱۲) قابل مشاهده است. سختی المان‌های پل  $4.58e+10 \text{ N.m}^2$  است و الگوریتم مقدار  $4.571e+10 \text{ N.m}^2$  را تخمین زده است و متغیر مسئله با درصد خطای قابل چشم‌پوشی  $0.25\%$  تعیین شده است.



شکل (۴-۱۲) نمودار همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی دو محوره (مجهول مسئله: سختی پل)



## ۴-۴- آنالیز نمونه‌های اندرکنش پل-خودروی دو محوره با در نظر گرفتن اثر الاستیک تایر

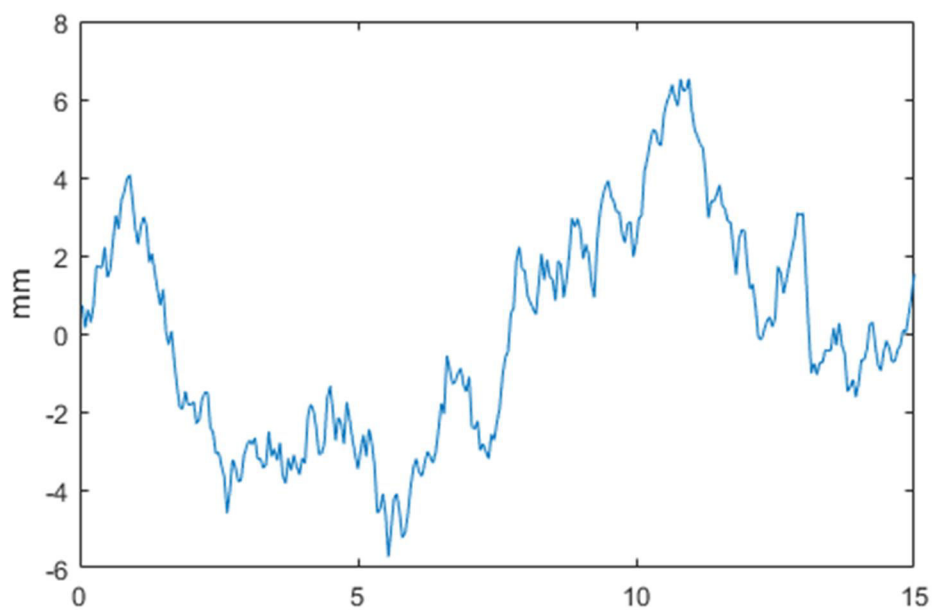
در این بخش پل با در نظر گرفتن پروفیل سطح جاده و خودرو با در نظر گرفتن اثر الاستیک تایر، مدل شده است. بنابراین مسئله‌ای که در این بخش مدل‌سازی شده است، در مقایسه با مسائل پیشین پیچیده‌تر و به مدل واقعی اندرکنش پل-خودرو نزدیکتر است. مشخصات پل و خودروی مورد بررسی در جدول زیر ارائه شده است [۲۸]:

جدول (۳-۴) پارامترهای پل و مجموعه‌ی جرم-فنر مدل‌سازی شده (اندرکنش پل-خودروی دو محوره با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر)

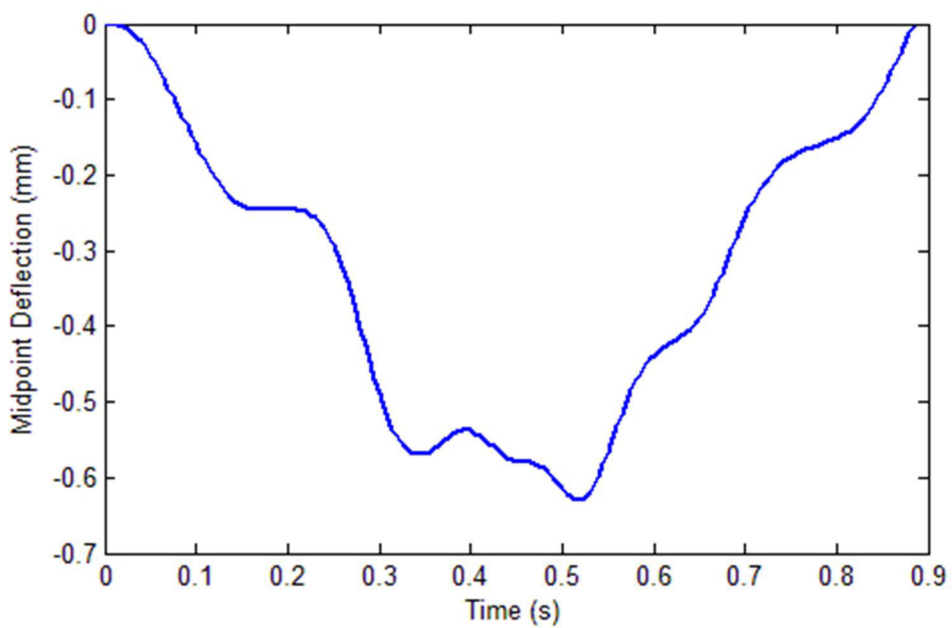
$m_v = 16200 \text{ Kg}$	جرم بدنه‌ی خودرو	$L=15 \text{ m}$	طول پل
$m_{u,1}=700 \text{ Kg}$	جرم محور جلوی خودرو	$m=28125 \text{ Kg/m}$	جرم بر واحد طول پل
$m_{u,2}=1100 \text{ Kg}$	جرم محور عقب خودرو	$EI=1.846e+10 \text{ N.m}^2$	سختی المان‌های سالم
$K_{s,1}=0.4e+3 \text{ KN/m}$	سختی محور جلوی خودرو	$\xi = 3 \%$	میرایی پل
$K_{s,2}=1e+3 \text{ KN/m}$	سختی محور عقب خودرو	$V=22 \text{ m/s}$	سرعت خودرو
$C_{s,1}=10e+3 \text{ N.s/m}$	میرایی محور جلوی خودرو	$K_{t,1}=1.75e+3 \text{ KN/m}$	سختی تایر جلوی خودرو
$C_{s,2}=20e+3 \text{ N.s/m}$	میرایی محور عقب خودرو	$K_{t,2}=3.5e+3 \text{ KN/m}$	سختی تایر عقب خودرو
$I_s=93457 \text{ Kg.m}^2$	ممان اینرسی خودرو	$D_1=2.375 \text{ m}$	فاصله مرکز جرم تا محور جلو
$f_{v,3}=8.83 \text{ Hz}$	فرکانس محور جلوی خودرو	$D_2=2.375 \text{ m}$	فاصله مرکز جرم تا محور عقب
$f_{v,4}=10.21 \text{ Hz}$	فرکانس محور عقب خودرو	$f_{v,1}=1 \text{ Hz}$	فرکانس جسم صلب
$f_{b,1}=5.66 \text{ Hz}$	اولین فرکانس اصلی پل	$f_{v,2}=1.55 \text{ Hz}$	فرکانس جسم صلب

**مثال ۸:** در این مسئله، مدل‌سازی اندرکنش پل و خودرو در نرم‌افزار متلب صورت گرفته است

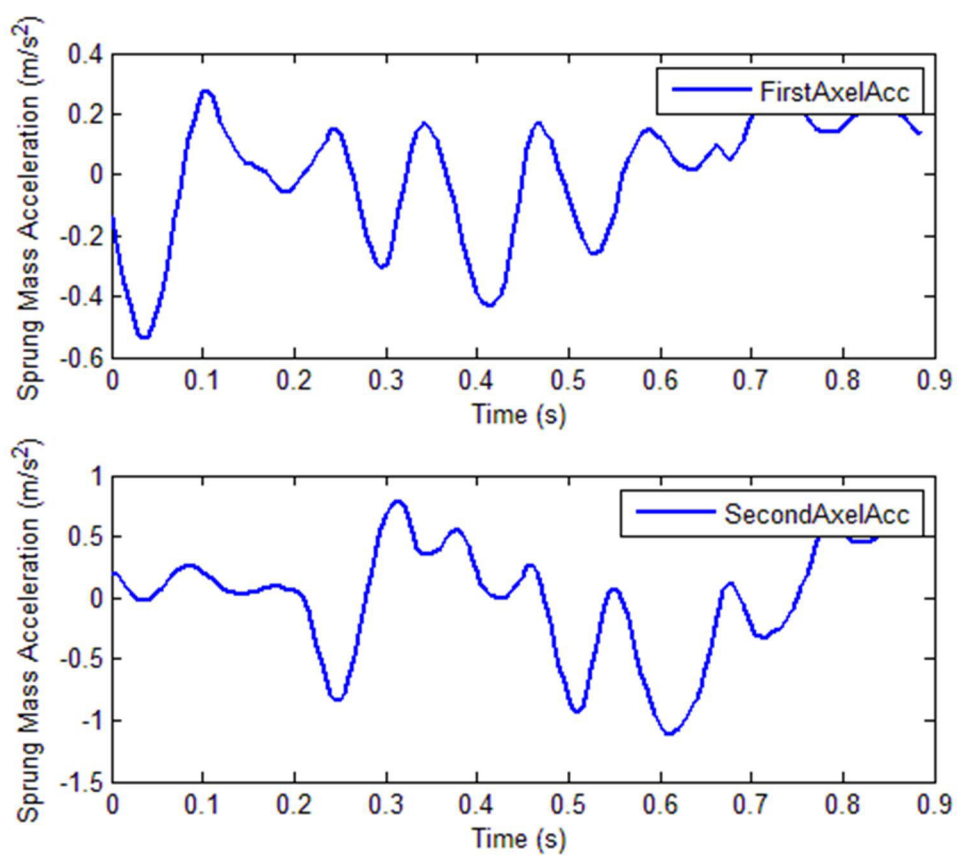
و نتایج در نمودارهای زیر قابل مشاهده هستند. در شکل (۴-۱۳) ارتفاع ناهمواری‌های سطح پروفیل جاده بر حسب میلی‌متر، در طول پل شبیه‌سازی شده است.



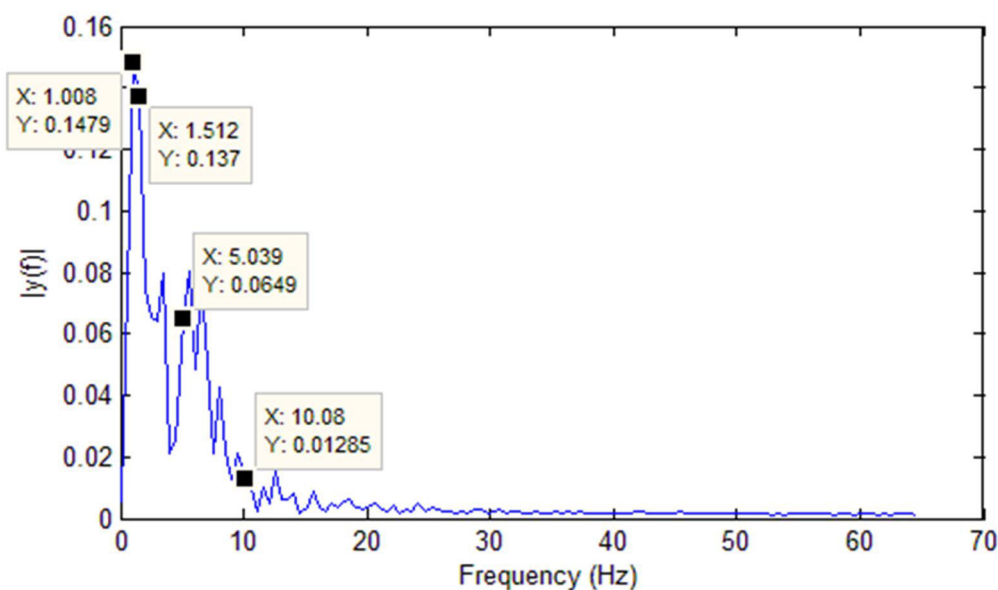
شکل (۴-۱۳) پروفیل جاده



شکل (۴-۱۴) تغییر شکل قائم نقطه‌ی وسط پل در مدل اندرکنش پل-خودروی دو محوره (با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر)



شکل (۴-۱۵) شتاب های قائم دو محور خودرو در مدل اندرکنش پل-خودروی دو محوره (با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر)



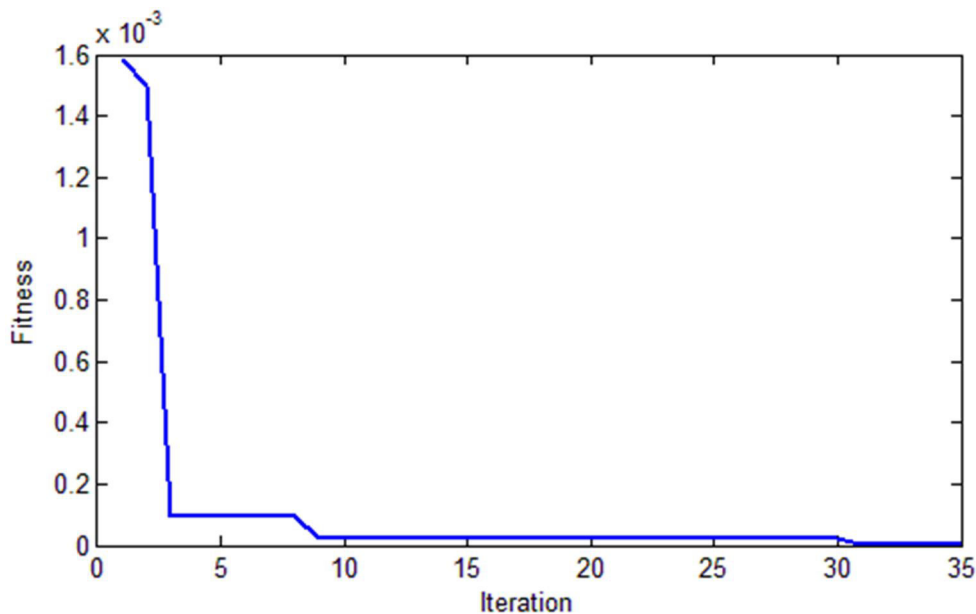
شکل (۴-۱۶) اعمال FFT بر شتاب های قائم محور جلوی خودرو در مدل اندرکنش پل-خودرو دو محوره (با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر)

مطابق شکل فوق تشخیص فرکانس‌های اصلی سازه و خودروی عبوری، زمانی که اثر ناهمواری‌های جاده لحاظ می‌شود، مشکل خواهد بود. بنابراین از مقایسه‌ی شکل (۴-۱۱) با شکل (۴-۱۶) به خوبی مشاهده می‌شود که حضور پروفیل جاده، طیف فرکانس را مخدوش ساخته و مانع از تشخیص فرکانس‌های طبیعی می‌شود. صحت سنجی این امر، در تحقیقات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است.

**مثال ۹:** در این مسئله پاسخ‌های سیگنال شتاب که از مدل‌سازی اندرکنش پل-خودروی دو محوره بدست آمده است، به عنوان داده‌ها و سختی پل EI، به عنوان مجهول در نظر گرفته شده است. در مسائل اندرکنش پل-خودروی دو محوره با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر و پروفیل جاده، دو حسگر شتاب‌سنج بر روی محورهای جلو و عقب خودرو نصب شده است و در هر لحظه دو عدد ثبت می‌شود. تابع هدف در این مسائل، کمی متفاوت با توابع هدف مسائل مورد بررسی تا این بخش می‌باشد.

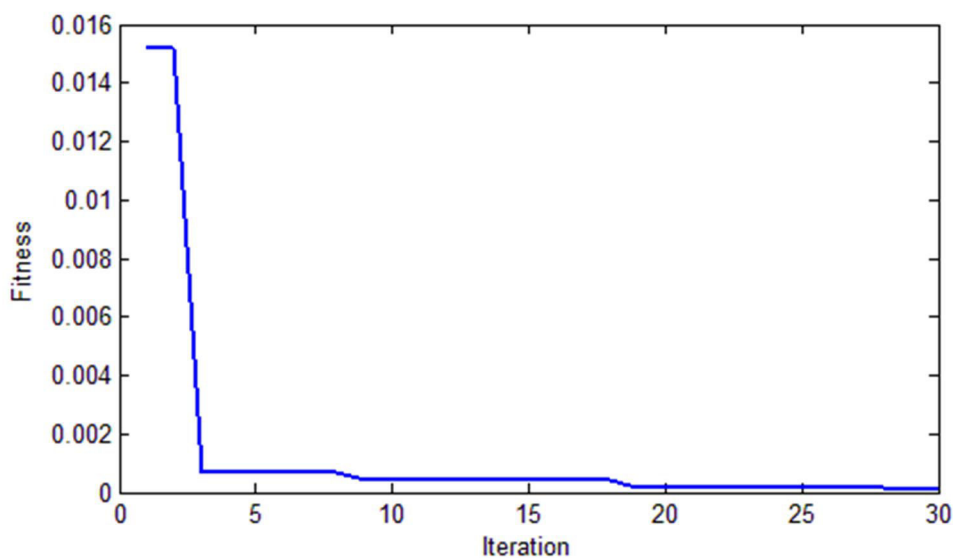
$$\begin{aligned}
 Y_1 &= a_{vehSen1} - a_{vehAlg1} \\
 Y_2 &= a_{vehSen2} - a_{vehAlg2} \\
 \text{Min} &= \sqrt{\left(\sum Y_1^2 + \sum Y_2^2\right)}
 \end{aligned}
 \tag{۲-۴}$$

در رابطه‌ی فوق  $a_{vehSen1}$  و  $a_{vehSen2}$  شتاب‌هایی هستند که از مدل‌سازی اندرکنش پل-خودرو بدست می‌آید،  $a_{vehAlg1}$  و  $a_{vehAlg2}$  شتاب‌هایی است که در هر تکرار، الگوریتم برای شتاب‌های دو محور خودرو تخمین زده است. الگوریتم بهینه‌یابی در جهت کمینه‌سازی تابع هدف پیش می‌رود. مشاهده می‌شود با وجود پیچیدگی مدل ریاضی اندرکنش پل-خودرو، الگوریتم به خوبی امکان تعیین متغیر مسئله را فراهم می‌سازد. نمودار همگرایی الگوریتم در شکل (۴-۱۷) قابل مشاهده است. سختی المان‌های پل  $1.846e+10 \text{ N.m}^2$  است و الگوریتم مقدار  $1.84597e+10 \text{ N.m}^2$  را تخمین زده است و متغیر مسئله با درصد خطای قابل چشم‌پوشی  $0.0015\%$  تعیین شده است.



شکل (۴-۱۷) نمودار همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی دو محوره (با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر، مجهول مسئله: سختی پل)

**مثال ۱۰:** در این مثال فرض شده است سختی المان هفتم به میزان 33% کاهش یافته است. ابتدا مدل اندرکنش پل-خودرو ایجاد و شتاب‌های دو محور خودرو تعیین شده‌اند. سپس شتاب‌ها به عنوان معلومات و سختی المان‌ها به عنوان مجهولات الگوریتم بهینه‌یابی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم به درستی محل المان آسیب دیده را شناسایی می‌کند. مقادیر سختی المان آسیب دیده  $1.23067 \times 10^{10} \text{ N.m}^2$  و سایر المان‌ها  $1.846 \times 10^{10} \text{ N.m}^2$  است. الگوریتم برای المان آسیب دیده با خطای 0.6% مقدار  $1.2233 \times 10^{10} \text{ N.m}^2$  و برای سایر المان‌ها با خطای 0.2% مقادیر  $1.8498 \times 10^{10} \text{ N.m}^2$  را شناسایی می‌کند که بسیار به مقادیر اصلی آنها نزدیک هستند و الگوریتم کارایی خوبی در تعیین متغیرها دارد. نمودار همگرایی الگوریتم در شکل (۴-۱۸) مشاهده می‌شود.



شکل (۴-۱۸) نمودار همگرایی الگوریتم برای اندرکنش پل-خودروی دو محوره (با در نظر گرفتن خاصیت الاستیک تایر، مجهول مسئله: سختی پل آسیب دیده)

درصد خطای محاسباتی مثال‌های ارائه شده، در جداول زیر قابل مشاهده است.

جدول (۴-۴) درصد خطای الگوریتم جستجوی ذرات باردار در محاسبه‌ی متغیرهای مسائل

شماره‌ی مثال	مقادیر حقیقی EI	مقادیر EI محاسباتی توسط الگوریتم	درصد خطای الگوریتم	مقادیر حقیقی EI در المان دچار آسیب	مقادیر EI محاسباتی توسط الگوریتم در المان دچار آسیب	درصد خطای الگوریتم
مثال 1	8.323e+9	8.3289e+9	0.07	-	-	-
مثال 3	8.323e+9	8.32765e+9	0.05	-	-	-
مثال 4	8.323e+9	8.323e+9	0.1	5.5487e+9	5.5486e+9	0.4
مثال 5	8.323e+9	8.32765e+9	0.1	6.24225e+9	6.22971e+9	0.2
مثال 7	4.58e+10	4.571e+10	0.2	-	-	-
مثال 9	1.846e+10	1.84597e+10	0.0015	-	-	-
مثال 10	1.846e+10	1.8498e+10	0.2	1.23067e+10	1.2233e+10	0.5

جدول (۵-۴) درصد خطای الگوریتم جستجوی ذرات باردار در محاسبه‌ی سختی و جرم خودرو

شماره‌ی مثال	مقادیر حقیقی جرم خودرو	مقادیر جرم خودرو محاسباتی توسط الگوریتم	درصد خطای الگوریتم	مقادیر حقیقی سختی خودرو	مقادیر سختی خودرو محاسباتی توسط الگوریتم	درصد خطای الگوریتم
مثال 3	5750 Kg	5729.12 Kg	0.3	1595 KN/m	1591.74 KN/m	0.2
مثال 5	5750 Kg	5757.5 Kg	0.13	1595 KN/m	1596.16 KN/m	0.07

با توجه به جداول فوق نتیجه می‌شود روش پیشنهادی کارایی خوبی در محاسبه‌ی مشخصات

سختی پل، سختی و جرم خودرو دارد. همچنین از روشی که ارائه کردیم می‌توانیم جهت شناسایی

آسیب نیز بهره ببریم.





## **فصل ۵:**

### **جمع بندی و پیشنهادها**

## ۵-۱- مقدمه

در این فصل به بیان خلاصه‌ای از نتایج و دستاوردهای حاصل از این پایان‌نامه پرداخته شده است. همچنین پیشنهادهایی نیز جهت ادامه‌ی پژوهش ارائه شده است.

## ۵-۲- محتوا

در پایان‌نامه‌ی حاضر سعی شده است بر خلاف روند رایج در شناسایی پارامترهای پل و خودروی عبوری از روی آن، که شامل انتقال از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس می‌باشد، با به کارگیری الگوریتم بهینه‌یابی به شناسایی پارامترها در حوزه‌ی زمان پرداخته شود.

در گام نخست با استفاده از نرم‌افزار متلب، مدل‌سازی عبور خودرو از روی پل انجام شده است. به این ترتیب، شتاب‌های دینامیکی خودروی عبوری از روابط اندرکنش پل-خودرو بدست می‌آید. این شتاب‌ها را می‌توان با نصب شتاب‌سنج بر روی خودروی عبوری از روی پل نیز بدست آورد. در این مدل‌سازی، سازه‌ی پل به صورت تیر اجزاء محدود در نظر گرفته شده است. جهت مدل‌سازی خودرو، سه مدل متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. اولین حالت، خودروی ساده‌ی تک محوره (تنها با در نظر گرفتن حرکت در راستای قائم خودرو) می‌باشد که جهت آشنایی با روابط اندرکنش خودرو-پل ارائه شده است. در مدل بعدی خودروی دو محوره بررسی شده است که به شکل جسم صلب بوده و حرکت دورانی خودرو حول مرکز جرم آن را نیز در نظر گرفته است. در آخرین مدل خودروی ارائه شده، به بررسی خودروی دو محوره با در نظر گرفتن سختی الاستیک تیر و پروفیل سطح جاده، پرداخته شده است. آخرین مدل خودرو، حالت ساده‌ی سازی شده‌ی خودروی واقعی است اما این ساده‌سازی به گونه‌ای است که پاسخ‌های حاصل به پاسخ‌های واقعی خودرو نزدیک هستند. از تمام مدل‌های ارائه شده، شتاب‌های خودروی عبوری و فرکانس‌های اصلی برداشت شده است. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد در صورت حضور پروفیل جاده، شناسایی فرکانس‌های اصلی پل از

شتاب‌های خودروی عبوری مخدوش می‌شود که در تطابق با نتایج مراجع قرار دارد.

در گام بعدی، طی یک روند مهندسی معکوس، با در دست داشتن شتاب خودرو به عنوان معلومات مسئله‌ی بهینه‌یابی و در نظر گرفتن سختی المان‌های پل و برخی خصوصیات خودرو به عنوان مجهولات در روابط اندرکنش، سعی شده است به کمک الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی ذرات باردار، مجهولات به گونه‌ای تخمین زده شوند که شتاب‌های اولیه حاصل شود. تابع هدف در الگوریتم بهینه‌یابی به صورت کمینه سازی اختلاف میان شتاب خودرو که از ابتدا در دست بود و آنچه الگوریتم بهینه‌یابی با قرار دادن مقادیر سختی و سایر مجهولات تخمینی در روابط اندرکنش بدست می‌آورد، تعریف شده است.

در نهایت مسائلی مورد بررسی قرار گرفته است که در آنها در اثر رویداد آسیب، سختی یک المان کاهش یافته است. در این مسائل نیز روند مشابهی طی شده است. ابتدا با کمک روابط اندرکنش، شتاب‌های خودروی عبوری با در نظر گرفتن آسیب مذکور در سازه‌ی پل، تعیین شده است. سپس شتاب خودرو معلوم و سختی هر یک از المان‌ها مجهول مسئله‌ی بهینه‌یابی تعریف شده‌اند.

نتایج حاکی است که روش پیشنهادی در شناسایی تمام متغیرهایی که برای مسائل تعریف شده است موفق عمل می‌کند و درصد خطاهای روش بسیار کم است. مشاهده می‌شود در مدل‌های پیچیده‌ی مورد بررسی که شامل در نظر گرفتن همزمان ناهمواری پروفیل جاده و رویداد آسیب در المان‌های پل می‌باشد، همچنان میزان و محل آسیب به خوبی تعیین می‌شود که این امر با توجه به مخدوش شدن فرکانس‌ها در صورت وجود ناهمواری پروفیل جاده، مزیت روش پیشنهادی نسبت به روش‌های متداول انتقال از حوزه‌ی زمان به فرکانس را آشکار می‌سازد.

## ۵-۳- پیشنهادها

جهت تحقیقات آینده، مطالب زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. پروفیل سطح جاده معلوم فرض شده است. می‌توانیم با فرض در دست نبودن پروفیل جاده،

ابتدا با کمک الگوریتم بهینه‌یابی به تخمین آن پرداخته و سپس سایر پارامترهای مجهول شناسایی شود.

۲. در تحقیق حاضر تنها به شناسایی سختی پیل و در برخی مسائل جرم و سختی خودرو پرداخته شده است. می‌توان روش پیشنهادی را جهت شناسایی میرایی پیل نیز مورد استفاده قرار داد.

## فصل ٦: مراجع

## مراجع

- [1] Chupanit, P., and Phromsorn, C., 'The importance of bridge health monitoring', *International Science Index*, Vol. 6, pp. 135-138, 2012.
- [2] Fujino, Y., and 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] Akgul, F., 'BMS development project with an integrated inspection program. Bridge Maintenance', *Safety, Management, Resilience and Sustainability*, pp. 2659-2665, 2012.
- [4] Fan, W., and Qiao, P., 'Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study', *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 1, pp. 83-111, 2011.
- [5] Yang, Y.-B., Lin, C., and Yau, J., 'Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle', *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 272, No. 3, pp. 471-493, 2004.
- [6] Yang, Y., and Lin, C., 'Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications', *Journal of sound and vibration*, Vol. 284, No. 1, pp. 205-226, 2005.
- [7] Lin, C., and Yang, Y., 'Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification', *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 13, pp. 1865-1878, 2005.
- [8] Pandey, A., Biswas, M., and Samman, M., 'Damage detection from changes in curvature mode shapes', *Journal of sound and vibration*, Vol. 145, No. 2, pp. 321-332, 1991.
- [9] Salawu, O., 'Detection of structural damage through changes in frequency: a review', *Engineering structures*, Vol. 19, No. 9, pp. 718-723, 1997.

- [10] Siringoringo, D.M., and Fujino, Y., ‘Estimating bridge fundamental frequency from vibration response of instrumented passing vehicle: analytical and experimental study’, *Advances in Structural Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 417-433, 2012.
- [11] Toshinami, T., Kawatani, M., and Kim, C., ‘Feasibility investigation for identifying bridge’s fundamental frequencies from vehicle vibrations’, In *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization: Proceedings of the Fifth International IABMAS Conference, Philadelphia, USA, 11-15 July 2010* (CRC Press), pp. 317-322, 2010.
- [12] Brincker, R., Zhang, L., and Andersen, P., ‘Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition’, In *Proc. of the 18<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas , 2000*.
- [13] Brincker, R., Zhang, L., and Andersen, P., ‘Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition’, *Smart materials and structures*, Vol. 10, No. 3, pp. 441, 2001.
- [14] Yang, Y., and Chang, K., ‘Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique’, *Journal of sound and vibration*, Vol. 322, No. 4, pp. 718-739, 2009.
- [15] McGetrick, P.J., Gonzalez, A., and O'Brien, E.J., ‘Theoretical investigation of the use of a moving vehicle to identify bridge dynamic parameters’, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 51, No. 8, pp. 433-438, 2009.
- [16] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., ‘*The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, The: Its Basis and Fundamentals’, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 5th edition, 2000.
- [17] González, A., ‘Vehicle-bridge dynamic interaction using finite element modelling’: ‘Finite element analysis’, *Crotia: Sciyo*, pp. 637-662, 2010.
- [18] Ju, S.-H., and Lin, H.-T., ‘A finite element model of vehicle–bridge interaction considering braking and acceleration’, *Journal of sound and vibration*, Vol. 303, No. 1, pp. 46-57, 2007.

- [19] Nguyen, T.X., and Van Tran, D., 'A finite element model of vehicle-cable stayed bridge interaction considering braking and acceleration' In Proceedings of the World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research, Busan, Korea, August 2014.
- [20] Ren, W.-X., and De Roeck, G., 'Structural damage identification using modal data. II: Test verification', Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 1, pp. 96-104, 2002.
- [21] Ren, W.-X., and De Roeck, G., 'Structural damage identification using modal data. I: Test verification', Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 1, pp. 87-95, 2002.
- [22] Oshima, Y., Yamaguchi, T., Kobayashi, Y., and Sugiura, K., 'Eigenfrequency estimation for bridges using the response of a passing vehicle with excitation system', In Proceedings of the fourth international conference on bridge maintenance, safety and management pp. 3030-3037, 2008.
- [23] Tan, G., Brameld, G., and Thambiratnam, D., 'Development of an analytical model for treating bridge-vehicle interaction', Engineering Structures, Vol. 20, No. 1-2, pp. 54-61, 1998.
- [24] Miyamoto, A., and Yabe, A., 'Bridge condition assessment based on vibration responses of passenger vehicle', In Journal of physics: conference series (IOP Publishing) pp. 012103, 2011.
- [25] Miyamoto, A., and Yabe, A., 'Development of practical health monitoring system for short-and medium-span bridges based on vibration responses of city bus', Journal of Civil Structural Health Monitoring, Vol. 2, No. 1, pp. 47-63, 2012.
- [26] Cantero, D., Ülker-Kaustell, M., and Karoumi, R., 'Time–frequency analysis of railway bridge response in forced vibration', Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 76, pp. 518-530, 2016.



- [27] Harris, N.K., González, A., O'Brien, E.J., and McGetrick, P., 'Characterisation of pavement profile heights using accelerometer readings and a combinatorial optimisation technique', *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 5, pp. 497-508, 2010.
- [28] O'Brien, E.J., McGetrick, P., and González, A., 'A drive-by inspection system via vehicle moving force identification', Vol. 13, No. 5, pp. 821-848 2014.
- [29] Keenahan, J., O'Brien, E.J., McGetrick, P.J., and Gonzalez, A., 'The use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping', *Structural Health Monitoring*, Vol. 13, No. 2, pp. 143-157, 2014.
- [30] González, A., Covián, E., and Madera, J., 'Determination of bridge natural frequencies using a moving vehicle instrumented with accelerometers and GPS', In *Proceedings of the Ninth International Conference on Computational Structures Technology, CST2008, Athens, Greece, 2-5 September, 2008* (Civil-Comp Press), 2008.
- [31] Yang, Y., Lee, Y., and Chang, K., 'Effect of road surface roughness on extraction of bridge frequencies by moving vehicle', *Engineering Structures*, pp. 295-305, 2014.
- [32] Zhu, X., and Law, S., 'Moving loads identification through regularization', *Journal of engineering mechanics*, Vol. 128, No. 9, pp. 989-1000, 2002.
- [33] Kaveh, A., and Talatahari, S., 'A novel heuristic optimization method: charged system search', *Acta Mechanica*, , Vol. 213, No. 3, pp. 267-289, 2010.
- [34] Kaveh, A., and Talatahari, S., 'Optimal design of skeletal structures via the charged system search algorithm', *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 41, No. 6, pp. 893-911, 2010.
- [35] Talbi, E.-G, 'Metaheuristics: from design to implementation', Vol. 74, John Wiley & Sons, 2009.
- [36] Yang, Y.-B., Yau, J., Yao, Z., and Wu, Y., 'Vehicle-bridge interaction dynamics: with applications to high-speed railways', World Scientific, 2004.

[37] Siringoringo, D.M., and Fujino, Y., 'Estimating bridge fundamental frequency from vibration response of instrumented passing vehicle: analytical and experimental study', *Advances in Structural Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 417-433, 2012.

## **Abstract:**

Bridges as key elements in transportation networks, are subjected to continuous degradation. These structures require an ongoing screening to give an early warning if the bridge becomes unsafe. In recent years a shift of instrumentation from the bridge to a passing vehicle to collect the indirect measurements, has occurred due to advantages that these methods provide. On the other hand, Charges System Search (CSS) has rarely been used for structural health monitoring. But since it does not require any gradient information, it has been used for structural applications. This paper proposes an indirect method based on optimization, to identify dynamic parameters of bridge and bridge stiffness. The method used in this investigation is based on optimization method rather than conventional transforms from time domain to frequency domain. The results show that the method is successful in using vehicle accelerations as input to the algorithm and identify bridge stiffness and dynamic parameters of vehicle-bridge system with good accuracy.

**Keywords:** indirect measurements, Charges System Search, health monitoring, dynamic parameters of bridge, bridge stiffness, vehicle accelerations.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Civil Engineering**

**Indirectly Bridge Parameters Identification by a Passing Vehicle and  
Charged System Search Algorithm**

**By:**  
**Shirin Ahmadi**

**Supervisor(s):**  
**Dr. Ali Keyhani**

**Advisor(s):**  
**Dr. Omid Khadem Hosseini**

**September 2016**

