دانشکده مهندسی
گروه عمران

پایان‌نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران
گرایش سازه

عنوان:

تحلیل پل‌های مرکب وکالیبراسیون مدل اجزاء محدود
"مطالعات موردی بر روی پل قلعه‌مرغی شهر تهران"

استاد راهنما:
دکتر فریدون رضایی

استاد مشاور:
دکتر محمد ملکی

پژوهشگر:
گونا احمدی

مهرماه ۱۳۸۸

همه امتیازهای این پایان‌نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد و در صورت استفاده تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا یا اساتید راهنمای پایان‌نامه و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز رسمی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه، ثبت شود؛ در غیر اینصورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

تقدیم به پدر بزرگوارم

و مادر مهربانم

که نگاهشان معنی امید است

و

تفسیر محبت

قدردانی و تشکر:

خداوند بزرگ و مهربان را شکر گذارم که به من توانایی داد تا بتوانم ذره ای از علم بی کرانش را فرا بگیرم و از لطف بی دریغش سپاسگذارم.

پدر و مادر مهربان و برادر عزیزم همیشه در طی دوران تحصیل و لحظه لحظه زندگیم حامی و پشتیبان من بوده اند، محبت ها و مهربانی هایشان را سپاس می گویم.

از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر فریدون رضایی که افتخار کسب علم در محضر ایشان را داشتم، نهایت تشکر و قدردانی را می نمایم.

از استاد مشاورم جناب آقای دکتر محمد ملکی به خاطر راهنمایی های ارزنده شان سپاسگذارم.

از آقایان دکتر خان محمدی و دکتر شوشتری که زحمت مطالعه و داوری این پایان نامه را بر عهده داشته اند متشکرم.

از جناب مهندس سیامک رزاقی و مهندس سبک دست که در انجام این پایان نامه و به ویژه در طی مراحل مدل سازی پل کمک فراوانی به اینجانب نمودند تشکر ویژه دارم.

از تمامی همکلاسی ها و دوستان خوبم که یار یکدیگر من در طی انجام این پایان نامه بوده اند و خاطرات دوران تحصیلم با وجود آنها برایم شیرین و به یادماندنی شد، ممنون و سپاسگذارم.

نام خانوادگی پژوهشگر: احمدی **نام**: گونا

عنوان پایان‌نامه: تحلیل پل‌های مرکب و کالیبراسیون مدل اجزا محدود؛ مطالعات موردی برروی پل قلعه‌مرغی شهر تهران

تعداد صفحه:۱۴۸

استاد راهنما: دکتر فریدون رضایی **استاد مشاور**: دکتر محمد ملکی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته**: مهندسی عمران **گرایش**: سازه

دانشگاه: بوعلی سینا **دانشکده**: مهندسی

کلید واژه‌ها: پل، وضعیت سنجی سلامت سازه‌ای، آزمایش بارگذاری، مدل‌سازی، کالیبراسیون مدل اجزا محدود

چکیده:

هدف از انجام این تحقیق استفاده از نتایج آزمایش‌های بارگذاری میدانی پل قلعه‌مرغی شهر تهران جهت کالیبراسیون مدل اجزا محدود آن می‌باشد. این پل با هدف بررسی علل ارتعاشات نامطلوب، تشخیص مشکلات پل، عیب‌یابی و مشخص نمودن دلایل لرزش ساختمان‌های اطراف به دلیل عبور وسائل نقلیه از روی پل، پس از نصب ابزار دقیق تحت آزمایش بارگذاری قرار گرفت.

جهت بررسی کامل رفتار پل و رفع ارتعاش آن می‌بایست مدلی از پل ساخته می‌شد. جهت ایجاد مدل بهینه و واقعی نیازمند کالیبراسیون مدل با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌باشیم. کالیبراسیون شامل تعیین پارامترهای ناشناخته و نامعلوم مدل بر اساس مقایسه نتایج و داده های حاصل از آزمایش بارگذاری با داده‌های حاصل از مدل اجزا محدود و تعدیل این پارامترها تا زمانیکه اختلاف بین داده‌های آزمایش و مدل تحلیلی مینیمم شود، می‌باشد. هدف از کالیبراسیون به دست آوردن مدلی صحیح از پل موردنظر می‌باشد که بتوان با استفاده از آن پاسخ سازه را تحت اثر هرگونه بارگذاری دیگری به ویژه بارهای طراحی، کامیون‌های استاندارد و زلزله مشاهده و پیشگویی نمود.

در این تحقیق ابتدا مدل اجزا محدود کاملی از پل ساخته شد و بارگذاری‌های استاتیک مطابق آزمایش های میدانی بر روی آن اعمال شد. پس از آنالیزهای اولیه بر روی مدل پل، پارامترهایی که ممکن بود در نتایج تاثیرگذار باشند مورد بررسی قرار گرفتند و دیده شد پارامترهایی که بیشترین تاثیر را در نتایج حاصل از مدل دارند، سختی خمشی تکیه‌گاه‌ها، نحوه اتصال المان‌های عرضی به شاهتیرها و فاصله المان‌های عرضی می باشند، که این عوامل نشان می‌دهند که سختی عرشه بیش از مقدار واقعی آن در مدل اولیه می باشد. پس از شناسایی این عوامل سعی شد با ایجاد تغییر در آنها مدل در راستای شبیه سازی دقیق با سازه واقعی کالیبره شود به طوری که مقادیر تغییرمکان‌ها و فرکانس‌های ارتعاش مدل و پل واقعی بیشترین تطابق و نزدیکی را داشته باشند.

سپس مدل کالیبره شده تحت یک آزمایش بارگذاری دیگر قرار گرفت و مشاهده شد نتایج تغییرمکان ها و فرکانس های ارتعاش حاصل از مدل و سازه واقعی همخوانی بسیار خوبی با هم دارند.

دیده شد کوچک شدن فاصله بین المان‌های عرضی عملکرد دال را در توزیع بار، بهتر و واقعی تر نشان می‌دهد و مدول الاستیسیته بتن عرشه نقشی در کالیبره کردن مدل این پل ندارد. همچنین محل اتصال شاهتیرها به المان‌های عرضی که در ابتدا به صورت گیردار مدل شده بود، در مدل نهایی به صورت ناحیه صلب در نظر گرفته شد و در نهایت عوامل ایجاد کننده ارتعاشات در پل قلعه‌مرغی نزدیک بودن فرکانس پل با فرکانس طبیعی برخی کامیون‌ها و وسائل نقلیه عبوری از روی پل، وجود ناهمواری در سطح عرشه و نزدیک بودن فرکانس غالب ارتعاش پل به فرکانس طبیعی ارتعاش ساختمان‌های مجاور تشخیص داده شد.

فهرست مطالب **صفحه**

مقدمه **۱**

فصل اول: کلیات و معرفی موضوع

۱-۱- مقدمه **۳**
۱-۲- روش‌های بارگذاری **۳**
۱-۲-۱- آزمایش بارگذاری استاتیکی ۴
۱-۲-۲- آزمایش بارگذاری دینامیکی ۶
۱-۳- وضعیت سنجی سلامت سازه‌ای **۸**
۱-۴- کالیبراسیون مدل اجزا محدود **۱۰**

فصل دوم: وضعیت‌سنجی سازه‌ها و مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- مقدمه **۱۳**
۲-۲- روش‌های مختلف تحریک پل‌ها **۱۳**
۲-۲-۱- روش تحریک ناشی از نیروهای محیطی ۱۴
۲-۲-۱-۱- تحریک محیطی – بار کامیون ۱۴
۲-۲-۱-۲- تحریک محیطی - بار ترافیک ۱۸
۲-۲-۱-۳- تحریک محیطی- بار باد و حرکت موج آب ۱۸
۲-۲-۱-۴- تحریک محیطی- زمین لرزه ۱۹
۲-۲-۲- تحریک ناشی از نیروهای خارجی ۲۰
۲-۲-۲-۱- تحریک ناشی از نیروهای خارجی – ضربه زدن ۲۰
۲-۲-۲-۲- تحریک ناشی از نیروهای خارجی - آسوده سازی ۲۱
۲-۲-۲-۳- تحریک ناشی از نیروهای ورودی- لرزاننده ۲۱
۲-۳- آزمایش‌های بارگذاری از نظر میزان و نحوه اعمال بار **۲۲**
۲-۳- ۱- آزمایش بارگذاری تکمیلی ۲۲
۲-۳-۲- آزمایش بارگذاری گواه ۲۳
۲-۳-۳- آزمایش بارگذاری تا حد خرابی ۲۵
۲-۴- وضعیت‌سنجی سازه از نظر روش مطالعه **۲۶**
۲-۴-۱- وضعیت‌سنجی سازه‌ها به‌صورت تئوری ۲۶
۲-۴-۲- وضعیت‌سنجی سازه‌ها با تحقیقات آزمایشگاهی ۲۷
۲-۴-۳- وضعیت‌سنجی سازه‌ها با تحقیقات میدانی ۲۸

۲-۴-۴- وضعیت‌سنجی سازه‌ها از نظر روش شناسایی ۲۹
۲-۵- هسته‌های تحقیقاتی مرتبط ۳۱
۲-۵-۱- آزمایشگاه ملی‌لوس‌آلاموس ۳۱
۲-۵-۲- دانشگاه کاتولیک لیون ۳۲
۲-۵-۳- کمیته وضعیت‌سنجی سلامت سازه انجمن مهندسی عمران آمریکا ۳۴
۲-۵-۴- مرکز تحقیقات راه‌آهن ایران ۳۴
۲-۶- مروری بر تحقیقات گذشته در خصوص تعیین مشخصات مکانیکی بالشتک‌های الاستومری تکیه‌گاهی پل‌ها ۳۸
۲-۶-۱- مشخصات رفتاری مواد الاستومر ۴۰
۲-۶-۱-۱- سختی الاستومر ۴۱
۲-۶-۱-۲- مدول برشی الاستومر ۴۲
۲-۶-۱-۳- آزمایش‌های استاندارد برای تعیین خواص مکانیکی و مدول برشی بالشتک الاستومری ۴۴
۲-۶-۱-۴- طراحی تکیه‌گاه‌های الاستومری ۴۵

فصل سوم: مفاهیم پایه در ارتعاش پل‌ها

۳-۱- مقدمه ۵۴
۳-۲- تاریخچه ۵۵
۳-۳- آنالیز دینامیکی تیر تحت عبور بار متحرک با سرعت ثابت ۵۷
۳-۴- آنالیز دینامیکی تیر تحت عبور بار زنده متحرک بزرگ ۶۱
۳-۵- ارتعاش تیر ناشی از جرم نوسان کننده ۶۲
۳-۶- درک و احساس ارتعاش در انسان ۶۸
۳-۷- عوامل ایجاد ارتعاش ۶۸
۳-۷-۱- ارتعاش ناشی از ترافیک ۶۹
۳-۷-۲- ارتعاش هوا برد ۶۹

فصل چهارم: معرفی پل قلعه مرغی و آزمایش بارگذاری آن

۴-۱- مقدمه ۷۰
۴-۲- مشخصات هندسی پل ۷۰
۴-۳- مشخصات مصالح مصرفی ۷۳
۴-۳-۱- بتن ۷۳
۴-۳-۲- میلگرد ۷۴
۴-۳-۳- فولاد ۷۴
۴-۳-۴- نئوپرن‌ها ۷۴

۴-۳-۵- مشخصات و ابعاد نئوپرن‌ها ۷۵
۴-۴- بازرسی چشمی ۷۶
۴-۵- معرفی تجهیزات برداشت و ثبت داده ۷۷
۴-۵-۱- حسگرها ۷۷
۴-۵-۱-۱- کرنش سنج ۷۸
۴-۵-۱-۲- شتاب‌سنج ۷۹
۴-۵-۱-۳- تغییرمکان‌سنج ۷۹
۴-۵-۲- آرایش و نامگذاری حسگرها ۸۱
۴-۵-۲-۱- مقاطع عرضی مورد آزمایش ۸۱
۴-۵-۲-۲- نامگذاری حسگرها ۸۲
۴-۶- برنامه بارگذاری ۸۴
۴-۶-۱- بارگذاری استاتیک و خصوصیات بارها ۸۵
۴-۶-۱-۱- آزمایش خمشی استاتیکی ۸۵
۴-۶-۱-۲- آزمایش پیچشی استاتیکی ۸۷
۴-۷- داده‌های مربوط به تغییر مکان سنج‌ها در آزمایش‌های استاتیکی ۸۹
۴-۷-۱- تغییر مکان در تکیه گاه اول دهانه سوم ۸۹
۴-۷-۲- تغییر مکان در وسط دهانه سوم ۹۰
۴-۷-۳- تغییر مکان در تکیه گاه دوم دهانه سوم یا تکیه گاه اول دهانه چهارم ۹۱
۴-۷-۴- تغییر مکان در وسط دهانه چهارم ۹۲
۴-۷-۵- تغییر مکان در تکیه گاه دوم دهانه چهارم ۹۳
۴-۸- مقادیر اندازه گیری شده توسط تجهیزات الکترونیکی در آزمایش‌های دینامیکی ۹۳

فصل پنجم: مدل‌سازی و کالیبراسیون مدل

۵-۱- مقدمه ۹۶
۵-۲- مدل کردن سازه پل قلعه‌مرغی ۹۷
۵-۲-۱- مدل‌سازی شاهتیرها و پایه‌ها ۹۷
۵-۲-۲- مدل‌سازی دال بتنی ۹۸
۵-۲-۳- مدل‌سازی تکیه‌گاه‌های روی پایه‌ها و کوله‌ها ۹۸
۵-۲-۴- مدل‌سازی نئوپرن‌ها ۹۸
۵-۲-۵- مدل‌سازی درز انبساط ۹۹
۵-۲-۶- نکاتی دیگر در مورد مدل‌سازی ۱۰۰
۵-۳- محاسبه سختی‌های انتقالی و دورانی تکیه‌گاه‌ها ۱۰۲
۵-۳-۱- سختی نئوپرن‌ها در محل پایه‌های A1,A2,P2,P5 ۱۰۲
۵-۳-۲- سختی نئوپرن‌ها در محل پایه‌های P3,P4 ۱۰۴

۵-۳-۳- سختی نئوپرن‌ها در محل پایه‌های P1,P6 ۱۰۵
۵-۴- آنالیز اولیه مدل ۱۰۶
۵-۴-۱- نتایج آزمایش خمشی استاتیکی ۱۰۷
۵-۴-۲- نتایج آزمایش پیچشی استاتیکی ۱۱۰
۵-۵- بررسی اثر نحوه اتصال المان‌های عرضی به شاهتیرها ۱۱۴
۵-۶- بررسی اثر فاصله المان‌های عرضی ۱۱۶
۵-۷- تاثیر مدول الاستیسیته بتن ۱۱۸
۵-۸- تاثیر سختی فنرهای تکیه‌گاهی ۱۲۰
۵-۹- کالیبراسیون مدل با داده‌های آزمایش ۱۲۲
۵-۹-۱- نتایج آزمایش خمشی استاتیکی ۱۲۴
۵-۹-۲- نتایج آزمایش پیچشی استاتیکی ۱۲۷
۵-۱۰- بررسی فرکانس ارتعاش پل ۱۳۱
۵-۱۱- بارگذاری مدل کالیبره شده ۱۳۱
۵-۱۲- بررسی عوامل ایجاد ارتعاشات پل قلعه‌مرغی ۱۳۳

فصل ششم: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۶-۱- مقدمه ۱۳۵
۶-۲- آنالیز اولیه مدل ۱۳۷
۶-۳- بررسی اثر نحوه اتصال المان‌های عرضی به شاهتیرها ۱۳۸
۶-۴- بررسی اثر فاصله المان‌های عرضی ۱۳۸
۶-۵- تاثیر مدول الاستیسیته بتن ۱۳۸
۶-۶- تاثیر سختی فنرهای تکیه‌گاهی ۱۳۹
۶-۷- کالیبراسیون مدل با داده‌های آزمایش ۱۴۰
۶-۸- نتایج نهایی ۱۴۱
۶-۹- پیشنهادات جهت مطالعات آینده ۱۴۲
مراجع ۱۴۴

فهرست شکل‌ها **صفحه**

فصل اول

شکل ۱-۱- استفاده از ریل‌های فرسوده راه‌آهن در آزمایش بارگذاری پل اکبرآباد ۵

فصل دوم

شکل ۲-۱- پل بتنی پیش‌تنیده هوپکینز در اوهایو ۱۶
شکل ۲-۲- تریلر مورد استفاده در بارگذاری پل بزرگراهی ایالت فلوریدا و مدل اجزا محدود آن ۱۷
شکل ۲-۳- پل I-40 واقع بر رودخانه Rio Grande در Albuquerque در ایالت نیومکزیکو ۳۲
شکل ۲-۴- پل Alamosa Canyon واقع در نیومکزیکو جنوبی ۳۲
شکل ۲-۵- پل روگذر پیش‌تنیده جعبه‌ای بتنی B15 ۳۴
شکل ۲-۶- پل روگذر پیش‌تنیده جعبه‌ای بتنیZ24 ۳۴
شکل ۲-۷- الف) بارگذاری استاتیکی پل اکبرآباد ب) آزمایش دینامیکی با عبور دیزل ۳۶
شکل ۲-۸- آزمایش بارگذاری دینامیکی پل تله‌زنگ با عبور قطار ۳۶
شکل ۲-۹- پل خرپایی نکا ۳۷
شکل ۲-۱۰- آزمایش ضربه پل خرپایی نکا توسط وزنه ۳۵ کیلوگرمی ۳۸
شکل۲-۱۱- تغییر شکل لایه‌های الاستومری ۴۶
شکل۲-۱۲- تاثیر مساحت بر تغییرات جابه‌جایی ۵۳

فصل سوم

شکل ۳-۱- تیر تحت عبور بار متحرک با سرعت ثابت ۵۷
شکل ۳-۲- تیرتحت عبور جرم نوسان کننده ۶۴
شکل ۳-۳- سیستم شکل (۳-۲) که توسط دو سیستم یک درجه آزادی مجزای کوپله نشان داده شده است. a) سیستم دینامیکی ایده آل سازی شده وسیله نقلیه (معادله ۳-۳۱)، b) سیستم دینامیکی تیر ایده آل سازی شده(معادله ۳-۳۰) ۶۵
شکل ۳-۴- ماکزیمم تغییرشکل دینامیکی پل ۶۷

فصل چهارم

شکل ۴-۱- پلان پل قلعه‌مرغی ۷۱
شکل ۴-۲- نمای طولی پل قلعه‌مرغی ۷۱
شکل ۴-۳- مقطع عرضی عرشه پل ۷۲
شکل ۴-۴- شکل کلی سطح مقطع شاهتیرها: الف) در محل وصله شاهتیرها ب) در طول شاهتیر ۷۲
شکل ۴-۵- نمایی از دهانه چهارم پل قلعه‌مرغی ۷۳
شکل ۴-۶- نمای زیرین پل و پایه‌ها ۷۳
شکل ۴-۷- شوره‌زدگی و خوردگی بتن زیر دال ناشی از زهکشی نامناسب ۷۷
شکل ۴-۸- جابجایی جانبی نئوپرنها ۷۷
شکل ۴-۹- کرنش‌سنج نصب شده به همراه پوشش مخصوص ۷۸
شکل ۴-۱۰- کرنش سنج و پایه نصب شده بر روی سطح کاملا صیقلی ۷۸

شکل ۴-۱۱- یک نمونه شتاب سنج نصب شده بر روی تیر ۸۰
شکل ۴-۱۲- تغییرمکان‌سنج‌های نصب شده جهت اندازه‌گیری جابجایی قائم و افقی ۸۰
شکل ۴-۱۳- موقعیت مقاطع مورد آزمایش ۸۱
شکل ۴-۱۴- آرایش کلی حسگرها در مقطع عرضی و نامگذاری آنها ۸۲
شکل ۴-۱۵- نحوه چیدمان کامیون‌ها و توقف آنها در ربع اول دهانه چهارم در آزمایش خمشی استاتیکی ۸۶
شکل ۴-۱۶- نحوه چیدمان کامیون‌ها و توقف آنها در وسط دهانه چهارم در آزمایش خمشی استاتیکی ۸۶
شکل ۴-۱۷- نمای طولی از پل قلعه مرغی و نحوه قرارگیری کامیونها در آزمایش خمشی استاتیکی که محور دوم کامیون در وسط دهانه چهارم(موقعیت ۷) ۸۷
شکل ۴-۱۸- نحوه چیدمان کامیونها و توقف آنها در وسط دهانه در آزمایش پیچشی استاتیکی ۸۸
شکل ۴-۱۹- اندازه تبدیل فوریه شتاب‌سنج‌های قائم نصب شده در مقطع اول (تکیه‌گاه مفصلی) ۹۴
شکل ۴-۲۰- اندازه تبدیل فوریه شتاب‌سنج‌های قائم نصب شده در مقطع چهارم (وسط دهانه ۴۵ متری) ۹۴
شکل ۴-۲۱- اندازه تبدیل فوریه شتاب‌سنج‌های قائم نصب شده در مقطع پنجم (تکیه گاه پیوسته) ۹۵
شکل ۴-۲۲- اندازه تبدیل فوریه شتاب‌سنج‌های نصب شده در جهت x و y و z روی زمین ۹۵

فصل پنجم

شکل ۵-۱- نمایی از مدل پل قلعه‌مرغی در نرم افزار SAP2000 ۱۰۱
شکل ۵-۲- نمای جانبی از مدل پل قلعه‌مرغی در نرم افزار SAP2000 ۱۰۱
شکل ۵-۳- نمایی از پایه‌ها و سطح زیرین مدل پل قلعه‌مرغی در نرم افزار SAP2000 ۱۰۲
شکل ۵-۴- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع اول (تکیه‌گاه مفصلی عرشه) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۰۸
شکل ۵-۵- تغییر مکان قائم تیرهای یک الی چهار در مقطع دوم (وسط دهانه ۳۰ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف در آزمایش بارگذاری ۱۰۸
شکل ۵-۶- تغییر مکان قائم تیرهای یک الی چهار در مقطع دوم (وسط دهانه ۳۰ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف در مدل ۱۰۹
شکل ۵-۷- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع سوم (تکیه‌گاه پیوسته) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۰۹
شکل ۵-۸- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع چهارم (وسط دهانه ۴ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۱۰
شکل ۵-۹- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع پنجم (تکیه‌گاه پیوسته) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۱۰
شکل ۵-۱۰- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع اول (تکیه‌گاه مفصلی عرشه) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۱۱
شکل ۵-۱۱- تغییر مکان قائم تیرهای یک الی چهار در مقطع دوم (وسط دهانه ۳۰ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف در آزمایش بارگذاری ۱۱۱
شکل ۵-۱۲- تغییر مکان قائم تیرهای یک الی چهار در مقطع دوم (وسط دهانه ۳۰ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف در مدل ۱۱۲
شکل ۵-۱۳- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع سوم (تکیه‌گاه پیوسته) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۱۲

شکل ۵-۱۴- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع چهارم (وسط دهانه ۴ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۱۳
شکل ۵-۱۵- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع پنجم (تکیه‌گاه پیوسته) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۱۳
شکل ۵-۱۶- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع چهارم (وسط دهانه ۴ متری) به ازاء قرارگیری کامیون‌ها در موقعیت ۷ آزمایش پیچش استاتیکی- فاصله المان‌های عرضی ۵ متر ۱۱۵
شکل ۵-۱۷- تغییرمکان وسط تیرهای یک الی چهار در مقطع ۴ در آزمایش خمش استاتیکی به ازاء مقادیر مختلف فاصله المان‌های عرضی – کامیون‌ها در موقعیت ۷ ۱۱۷
شکل ۵-۱۸- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع چهارم (وسط دهانه ۴ متری) در آزمایش پیچش استاتیکی به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف و فاصله المان‌های عرضی ۰/۵ متر ۱۱۸
شکل ۵-۱۹- تغییرمکان وسط تیرهای یک الی چهار در مقطع ۲ در آزمایش خمش استاتیکی به ازاء مقادیر مختلف مدول الاستیسیته بتن – کامیون‌ها در موقعیت ۳ ۱۱۹
شکل ۵-۲۰- تغییرمکان وسط تیرهای یک و چهار در مقطع ۴ در آزمایش خمش استاتیکی به ازاء مقادیر مختلف مدول الاستیسیته بتن – کامیون‌ها در موقعیت ۷ ۱۱۹
شکل ۵-۲۱- تغییرمکان وسط تیرهای دهانه چهارم (مقطع ۴) در بارگذاری خمشی استاتیکی به ازاء افزایش در سختی خمشی تکیه‌گاه هر تیر – کامیون‌ها در موقعیت۷ ۱۲۱
شکل ۵-۲۲- تغییرمکان وسط تیرهای دهانه سوم (مقطع۲) در بارگذاری خمشی استاتیکی به ازاء افزایش در سختی خمشی تکیه‌گاه هر تیر – کامیون‌ها در موقعیت۳ ۱۲۱
شکل ۵-۲۳- تغییرمکان وسط تیرهای دهانه چهارم(مقطع ۴) در بارگذاری پیچشی استاتیکی به ازاء افزایش در سختی خمشی تکیه‌گاه هر تیر – کامیون‌ها در موقعیت ۷ ۱۲۲
شکل ۵-۲۴- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع اول (تکیه‌گاه مفصلی عرشه) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۲۴
شکل ۵-۲۵- تغییر مکان قائم تیرهای اول و دوم در مقطع دوم (وسط دهانه ۳۰ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف در آزمایش بارگذاری ۱۲۵
شکل ۵-۲۶- تغییر مکان قائم تیرهای سوم و چهارم در مقطع دوم (وسط دهانه ۳۰ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف در آزمایش بارگذاری ۱۲۵
شکل ۵-۲۷- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع سوم (تکیه‌گاه پیوسته) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۲۶
شکل ۵-۲۸- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع چهارم (وسط دهانه ۴ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۲۶
شکل ۵-۲۹- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع پنجم (تکیه‌گاه پیوسته) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۲۷
شکل ۵-۳۰- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع اول (تکیه‌گاه مفصلی عرشه) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۲۸
شکل ۵-۳۱- تغییر مکان قائم تیرهای اول و دوم در مقطع دوم (وسط دهانه ۳۰ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف در آزمایش بارگذاری ۱۲۸

شکل ۵-۳۲- تغییر مکان قائم تیرهای سوم و چهارم در مقطع دوم (وسط دهانه ۳۰ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف در آزمایش بارگذاری ۱۲۹
شکل ۵-۳۳- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع سوم (تکیه‌گاه پیوسته) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۲۹
شکل ۵-۳۴- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع چهارم (وسط دهانه ۴ متری) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۳۰
شکل ۵-۳۵- تغییر مکان قائم تیرهای یک و چهار در مقطع پنجم (تکیه‌گاه پیوسته) به ازاء قرارگیری کامیون در موقعیت‌های مختلف ۱۳۰
شکل ۵-۳۶- تغییر مکان در وسط تیرهای دهانه سوم (مقطع شماره ۲) به ازاء قرارگیری کامیون‌ها در موقعیت ۶ آزمایش بارگذاری خمشی استاتیکی ۱۳۱
شکل ۵-۳۷- تغییر مکان در وسط تیرهای دهانه سوم (مقطع شماره ۲) به ازاء قرارگیری کامیون‌ها در موقعیت ۸ آزمایش بارگذاری خمشی استاتیکی ۱۳۲
شکل ۵-۳۸- تغییر مکان در وسط تیرهای دهانه چهارم (مقطع شماره ۴) به ازاء قرارگیری کامیون‌ها در موقعیت ۶ آزمایش بارگذاری خمشی استاتیکی ۱۳۲

فهرست جداول **صفحه**

فصل دوم

جدول ۲-۱- رابطه بین سختی و مدول برشی بالشتک‌های الاستومری پل‌ها ۴۲

فصل چهارم

جدول ۴-۱- مشخصات و تعداد نئوپرن‌های به کار رفته در پایه‌ها و کوله‌ها ۷۴

جدول ۴-۲- مشخصات و ابعاد نئوپرن‌ها ۷۵

جدول ۴-۳- موقعیت مقاطع مورد آزمایش پل ۸۱

جدول ۴-۴- مشخصات تغییرمکان سنج های نصب شده در پل ۸۳

جدول ۴-۵- بار دقیق کامیون‌های مورد استفاده در بارگذاری پل قلعه مرغی ۸۴

جدول ۴-۶- مشخصات کامیون و تریلی مورد استفاده در بارگذاری پل ۸۵

جدول ۴-۷- مشخصات بارگذاری‌های استاتیک ۸۸

جدول ۴-۸- مراحل بارگذاری در آزمایشهای استاتیکی ۸۹

جدول ۴-۹- مقادیر تغییر مکان در تکیه گاه اول دهانه سوم (مقطع شماره ۱) بر حسب میلیمتر ۹۰

جدول ۴-۱۰- مقادیر تغییر مکان در وسط دهانه سوم (مقطع شماره ۲) بر حسب میلیمتر ۹۱

جدول ۴-۱۱- مقادیر تغییر مکان در تکیه گاه اول دهانه چهارم (مقطع شماره ۳) بر حسب میلیمتر ۹۲

جدول ۴-۱۲- مقادیر تغییر مکان در وسط دهانه چهارم (مقطع شماره ۴) بر حسب میلیمتر ۹۲

جدول ۴-۱۳- مقادیر تغییر مکان در تکیه گاه دوم دهانه چهارم (مقطع شماره ۵) بر حسب میلیمتر ۹۳

فصل پنجم

جدول ۵-۱- مقادیر نهایی برای پارامترهای کالیبراسیون و غیر آنها ۱۲۳

جدول ۵-۲- مقادیر کالیبره شده سختی خمشی تکیه‌گاه(R3=Ry) در محل پایه‌ها و زیر تیرهای مختلف (ton.m/rad) ۱۲۳

فصل ششم

جدول ۶-۱- مقادیر نهایی برای پارامترهای کالیبراسیون و غیر آنها ۱۴۰

جدول ۶-۲- مقادیر کالیبره شده سختی خمشی تکیه‌گاه(R3=Ry) در محل پایه‌ها و زیر تیرهای مختلف (ton.m/rad) ۱۴۱

مقدمه

گزارشات اخیر نشان می‌دهند که بسیاری از پل‌های موجود در کشورهای مختلف پس از بازرسی‌های بصری و سنجش سلامت آنها بر اساس این مشاهدات، از لحاظ سازه‌ای ناکارا و از لحاظ عملکرد غیر قابل استفاده ارزیابی می‌شوند. به همین جهت تعداد زیادی باید مقاوم‌سازی شوند و تعدادی نیز تخریب و نوسازی شوند. با توجه به هزینه زیاد تخریب و ساخت سازه جدید و مشکلات دیگری از جمله اختلال در ترافیک و عبور و مرور انجام این کار تا قبل از اطمینان کامل از ناکفایتی سازه امری غیر اقتصادی به نظر می‌رسد. با پیشرفت‌ها و فن‌آوری‌هایی که در زمینه تجهیزات ابزار دقیق و ابزار ثبت اطلاعات حاصل شده مقوله‌ای تحت عنوان وضعیت سنجی سلامت سازه‌ای[1] مطرح شد. با استفاده از این تجهیزات کمیت‌هایی چون تغییرمکان، چرخش، کرنش و شتاب در نقاط مختلف از سازه‌ای که تحت بارگذاری خاصی قرار گرفته مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. داده‌های ثبت شده نتایج خوبی از نحوه عملکرد اجزا و رفتار کلی سازه و بسیاری اطلاعات دیگر در اختیار خواهند گذاشت. این فن‌آوری، شناسایی، ارزیابی، تعمیر و نگهداری پیش‌بینانه سازه‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد.

در ایران نیز با وجود بیش از ۸۰۰۰ دستگاه پل شناخت رفتار واقعی آنها در جهت پیشبرد مدیریت صحیح حائز اهمیت فوق‌العاده‌ای می‌باشد. در کشور ما وضعیت سنجی سلامت سازه‌ای پل‌ها و به تبع آن انجام آزمایش بارگذاری سابقه چندانی ندارد و در پل‌هایی همچون نکا، اکبرآباد، تله زنگ و قلعه‌مرغی صورت گرفته است.

پروژه رفتار سنجی پل قلعه مرغی با هدف بررسی علل ارتعاشات نامطلوب، تشخیص مشکلات پل، عیب یابی و مشخص نمودن دلایل لرزش ساختمان های اطراف به دلیل عبور وسایل نقلیه از روی پل بوسیله بارگذاری و نصب ابزار دقیق توسط سازمان مهندسی و عمران شهر تهران و با همکاری اداره خط و سازه‌های فنی راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران انجام شد. پل قلعه‌مرغی در منطقه ۱۷ شهرداری تهران و در انتهای خیابان قلعه‌مرغی واقع شده که به صورت روگذر از راه‌آهن تهران - جنوب می‌گذرد.

1-Structural Health Monitoring (SHM)

این پل در قوس افقی به شعاع ۱۴۰ متر واقع شده و دارای عرض کلی ۱۷/۸ متر است و بر روی آن ۴ خط عبور (۲ خط رفت و ۲ خط برگشت) وجود دارد. سیستم عرشه پل به صورت تیرهای صندوقه‌ای فلزی می‌باشد که با دال بتنی تشکیل مقطع کامپوزیت را می‌دهند. در عرض پل ۴ تیر وجود دارد و فاصله محور تا محور آنها ۴/۴ متر می‌باشد. اتصال تابلیه به پایه‌ها و کوله‌ها توسط تکیه گاه‌های الاستومری (نئوپرن) صورت می‌گیرد.

بازدیدهای میدانی و برداشت چشمی اطلاعات به منظور بررسی اولیه پل و تشخیص خرابی‌های احتمالی که منجر به بروز لرزش در ساختمانهای اطراف می‌شود و نیز شناخت ظاهری سازه انجام شد. طی این مرحله علیرغم وجود برخی خرابیهای جزئی وضعیت سازه مناسب ارزیابی شد.

در این تحقیق با در دست داشتن نتایج آزمایش‌های بارگذاری بر روی این پل، مدل اجزا محدود ساخته شده از آن کالیبره می‌شود. در فصل اول ابتدا به معرفی موضوع و کلیاتی در رابطه با وضعیت سنجی سلامت سازه‌ای و کالیبراسیون پرداخته می‌شود. در فصل دوم به بررسی تحقیقات گذشته پرداخته می‌شود. فصل سوم با توجه به اینکه مشکل سازه‌ای پل قلعه مرغی ارتعاش نامطلوب آن می‌باشد، به مفاهیم پایه در ارتعاش پل‌ها اختصاص داده می‌شود. در فصل چهارم مشخصات سازه ای پل قلعه مرغی و آزمایش بارگذاری آن و در فصل پنجم مدل‌سازی و مراحل کالیبراسیون مدل و علل ایجاد ارتعاش در پل شرح داده می‌شود. و فصل آخر به جمع‌بندی و ارائه مقادیر پارامترهای موثر در کالیبراسیون این پل پرداخته می‌شود.

۱-۱- مقدمه

فن‌آوری تخمین و شناسایی سیستم‌های سازه‌ای و مکانیکی به منظور وضعیت‌سنجی، عیب‌یابی و معتبرسازی مدل‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فن‌آوری، تعمیر و نگهداری پیش‌بینانه سازه‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. فن‌آوری مذبور در حوزه مهندسی هوا و فضا و مهندسی مکانیک به بلوغ خود رسیده است و روش‌های اندازه‌گیری و تحلیل اطلاعات موجود با رعایت نکات فنی و اقتصادی به خوبی شکاف بین مدل‌سازی‌های تئوری و رفتار مشاهده شده از سیستم‌های مکانیکی را پر می‌کند. این فن‌آوری در حوزه مهندسی عمران هنوز به بلوغ خود نرسیده و چالش‌ها و مسائل حل‌نشده فراوانی دارد. دلیل این امر بزرگ و غیر قابل کنترل بودن و عدم قطعیت‌های فراوان موجود در سازه‌های عمرانی می‌باشد که ارائه یک روش قابل اطمینان فنی و اقتصادی را دشوار کرده است. افزایش اهمیت تعمیر و نگهداری سازه‌ها در مقابل ساخت سازه جدید، مخصوصا در کشورهای توسعه یافته، اهمیت این موضوع را افزایش داده است به طوری که دهه اخیر را می‌توان دهه تعمیر و نگهداری سازه‌ها نام نهاد. این فن‌آوری در سه بخش روش‌های بارگذاری، کمیت‌های مورد اندازه‌گیری و روش‌های تحلیل و مدیریت اطلاعات اندازه‌گیری شده قابل بررسی است.

۱-۲- روش‌های بارگذاری

یکی از مهمترین فن‌آوری‌ها در زمینه شناسایی سازه‌های عمرانی به‌ویژه پل‌ها انجام آزمایش بارگذاری بر روی آنها است. آزمایش بارگذاری پل کمک شایان توجهی به مهندسین پل در فهم رفتار پل از لحاظ سرویس‌دهی، عملکرد سازه‌ای، ظرفیت سازه‌ای، مقاومت حالت حدی تحت بارهای زنده می نماید و نتایج حاصل از آن جهت تمهیدات بهسازی و مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش همچنین روشی مناسب جهت پر نمودن فضای خالی بین تئوری و واقعیت می‌باشد و تقریباً سریع بوده و قادر به حذف تمامی فرضیات مشکوک در مراحل اولیه ارزیابی می‌باشد. پس از احداث یک پل، معمولاً انجام آزمایش بارگذاری تحت بارهای مختلف جهت تعیین پاسخ سازه با استفاده از

ابزار سنجش و اندازه‌گیری تنش، کرنش و شتاب معمول می‌باشد. انجام این آزمایش امکان تأیید فرضیات مورد استفاده در تحلیل‌های اولیه در رابطه با نحوه پخش بار، سطوح تنش و تغییرمکان را فراهم می‌آورد. حتی تکنیک‌های مدرن آنالیزهای سازه‌ای هرگز نمی‌توانند جایگزین تست‌های سازه واقعی برای تعیین عملکرد سازه و پاسخ واقعی آن تحت اثر بارهای زنده و مرده شوند. این تست‌ها قابل اطمینان‌ترین منبع اطلاعات پاسخ دینامیکی پل و تنها راه برای معتبرسازی نهایی آنالیز اجزا محدود آن می‌باشند. [۱] [۲] [۳]

روش‌های بارگذاری، به روش‌های بارگذاری استاتیکی و روش‌های بارگذاری دینامیکی تقسیم بندی می‌شود. روش‌های بارگذاری دینامیکی در پل‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول ناشی از بارخارجی معلوم (مانند ضربه و تکان‌دهنده‌ها۱) و دسته دوم ناشی از ارتعاشات محیطی۲ (ترافیک، عبور وسیله نقلیه مشخص، باد، موج دریا و زلزله) می‌باشد. استفاده از وسیله نقلیه مشخص درآزمایش غیر مخرب استاتیکی و دینامیکی اقتصادی‌ترین روش بارگذاری در پل‌ها می‌باشد. از آنجائیکه در حوزه مهندسی هوا و فضا و مکانیک از این روش بارگذاری زیاد استفاده نمی‌گردد نیاز به ارائه روش هایی جهت تحلیل و مدیریت اطلاعات اخذ شده از این نوع آزمایش و استفاده از این اطلاعات در شناخت نحوه عملکرد اجزا سازه و همچنین کالیبره کردن مدل‌های اجزا محدود، در حوزه مهندسی عمران ضروری به نظر می‌رسد.

۱-۲-۱- آزمایش بارگذاری استاتیکی

این نوع آزمایش شامل بارگذاری سازه با بارهای مرده متمرکز یا گسترده می‌باشد. مناسب‌ترین روش جهت بارگذاری استفاده از کامیون می‌باشد به این دلیل که متحرک بوده و به راحتی قابلیت قرارگیری در ایستگاه‌های از پیش تعیین شده بارگذاری در طول پل را دارند. روش دیگر استفاده از سربارهای اضافی است که اصطلاحاً بار مرده اطلاق می شود. این سربارها از جنس بلوک های بتنی یا

1- shaker
2-ambient vibrations

فلزی ساخته می شوند و توسط چرثقیل‌های متحرک به‌صورت بار متمرکز یا گسترده بر روی عرشه پل قرار داده می شوند. همواره باید توجه نمود که قرارگیری آنها به سطح روسازی عرشه پل خللی وارد ننماید.

یک روش دیگر استفاده از مخازن آب است. مخازن آب وسایل مناسبی جهت شبیه سازی بار مرده یکنواخت محسوب می‌شوند. در ابتدا این مخازن دارای وزن نسبتاً کمی هستند و پس از قرارگیری در محل به آهستگی با آب پر می‌شوند تا خطر و تبعات سوء اعمال ناگهانی بار به حداقل برسد. انواع مختلف آنها در دستورالعمل آزمایش بارگذاری تکمیلی ICE (ICE 1998) مورد بررسی قرار گرفته است. انواع مخازن انعطاف پذیر عبارتند از: الف) مخازن بالشتکی که در پلان بصورت مربعی بوده و ارتفاع آنها در حالت پر به حدود ۵۰۰ میلیمتر می رسد. ب) مخازن استوانه‌ای یا مستطیلی که حداکثر ظرفیت ۱۰۰ تن را دارا می‌باشند. ج) کیسه‌های آب که جهت آویزان نمودن از عرشه پل طراحی شده‌اند. مشکل اصلی این روش بارگذاری، نیاز به منبع آب آماده در حجم بالا و زمان زیاد جهت پر و خالی نمودن آنها می باشد.[۳]

البته جهت اعمال بار مرده در آزمایش بارگذاری استاتیکی بنا به امکاناتی که در دسترس است از روش‌های دیگری هم می‌توان استفاده کرد. به عنوان نمونه در آزمایش بارگذاری پل اکبرآباد از ریل های فرسوده راه‌آهن جهت اعمال بار استفاده شد که تصویر آن در شکل ۱-۱ آمده است.

شکل ۱-۱- استفاده از ریل‌های فرسوده راه‌آهن در آزمایش بارگذاری پل اکبرآباد