بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی عمران

تحلیل غیرخطی پلهای قوسی سنگی

به روش اجزاء محدود

آرمین صادقیان

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران- سازه

استاد راهنما:

دکتر محسنعلی شایانفر

آذرماه ۸۴

تقدیم به پدر و مادرم که اگر موفقیتی هست متعلق به آنهاست...

و تقدیم به برادران و خواهرم

چکیده :

پلهای قوسی یکی از اولین انواع سازه های ساخته شده توسط بشر می باشند که قدمت ساخت آنها نزدیک پنج هزار سال می باشد. اگرچه امروزه پلهای قوسی با مصالح بنایی به ندرت ساخته می شوند، لیکن هنوز بسیاری از این گونه پلها پابرجا هستند و باتوجه دوام و پایداری بسیارخوب، درحال سرویس دهی می باشند. با اختراع راه آهن پلهای بسیاری برای ایجاد خطوط آهن در کشورهای مختلف ساخته شدند که امروزه قدمتی بین ۵۰ تا ۲۰۰ سال دارند و بسیاری از آنها هنوز هم به همین منظور تحت سرویس دهی می باشند. تعداد بسیار زیاد این پلها امکان جایگزینی آنها را محدود کرده است. به علاوه دوام و پایداری آنها به قدری زیاد است که امکان استفاده از آنها تا چندین سال دیگر را فراهم می سازد. به عنوان مثال در کشور انگلستان بیش از هفتاد هزار پل قوسی بنایی در بزرگراه ها و خطوط آهن در حال سرویس دهی می باشند. در کشور ما نیز تنها در خط آهن جنوب بیش از شش هزار پل قوسی بنایی وجود دارد. می توان تخمین زد که تعداد پلهای مذکور در مسیر راه آهن کشورمان بیش از ده هزار بنا باشد. لذا باتوجه به اهمیت فوق العاده راه آهن که یکی از شریانهای اصلی در حمل و نقل و اقتصاد کشور می باشد می توان به اهمیت فوق العاده این سازه ها پی برد. اگرچه پلهای مذکور دارای قدمت زیادی

هستند، لیکن به دلیل رفتار بسیار پیچیده این گونه سازه ها، به نسبت انواع فولادی و بتنی، فاقد روش های ارزیابی کمی شناخته شده ای می باشند. با ورود کامپیوتر به صحنه تکنولوژی، امکان بیشتری برای پیش بینی رفتار این سازه ها ایجاد شده است. از حدود بیست سال پیش اولین استفاده ها از روش اجزاء محدود برای ارزیابی کمی پلهای قوسی صورت گرفت. لیکن در ابتدا مدلهای ساخته شده خیلی ساده بودند و به مدلهای یک بعدی خلاصه می شوند. اما با پیشرفت تکنولوژی محاسبات امکان ایجاد مدلهای پیچیده تر دو بعدی و سه بعدی فراهم شده است و امروزه روش های مختلف و پیچیده ای برای مدلسازی این سازه ها به کار می رود. لیکن بسیاری از این روش ها به قدری پیچیده هستند که یا استفاده از آنها امکان پذیر نبوده و یا صرفه اقتصادی ندارند. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از آخرین امکانات موجود نرم افزاری مدلی ساده و در عین حال با دقت مناسب جهت ارزیابی کمی این گونه پلها ارائه شود. مدل مذکور دارای خواص غیرخطی همچون ترک خوردگی، خردشدگی، رفتار پلاستیک و المانهای تماسی می باشد و برای بررسی صحت آن از نتایج تجربی استفاده شده است. نتایج بدست آمده از آنالیز همخوانی مناسبی با نتایج تجربی دارند و می توان نتیجه گرفت که با استفاده از مدل اجزاء محدود غیرخطی سه بعدی، می توان با تقریب مناسبی رفتار پلهای قوسی سنگی را مورد بررسی قرار داد و در ارزیابی کمی این سازه ها از این روش استفاده کرد.

در پایان لازم می دانم از پشتیبانی و راهنماییهای استاد ارجمند جناب آقای دکتر شایانفر کمال تشکر و امتنان را داشته باشم. همچنین از داوران محترم آقایان دکتر قدرتی امیری و دکتر معرفت قدردانی می نمایم. امید است که در آینده توجه بیشتری به این موضوع شده و پیشرفتهای مناسب تری در این زمینه بدست بیاید.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ۱

فصل اول : آشنایی با اجزاء و رفتار سازه‌ای پلهای قوسی بنایی ۹

۱-۱-ساختمان پل های قوسی بنایی ۱۰

۱-۱-۱- کلیات ۱۰

۱-۱-۲- فونداسیون ها ۱۲

۱-۱-۳- پایه ها ۱۲

۱-۱-۴- قوس پل ۱۳

۱-۱-۵- اشکال قوسها ۱۴

۱-۱-۶- قوسهای اریب ۱۵

۱-۱-۷- دیوارهای جانبی و جان پناه ها ۱۶

۱-۱-۸- مصالح پرکننده ۱۷

۱-۱-۹- کوله ها ۱۷

۱-۱-۱۰- تیرچه های بنایی و دیوارهای داخلی ۱۸

۱-۱-۱۱- پلهای قوسی با کناره باز ۱۸

۱-۲- رفتار زیر بار پلهای قوسی بنایی ۱۹

۱-۲-۱- پلهای اریب ۲۱

۱-۲-۲- پلهای چند دهانه ای ۲۲

فصل دوم : آشنایی با روشهای ارزیابی کمی پلهای قوسی ۲۳

۲-۱- روش‌های اولیه طراحی ۲۴

۲-۲- تکامل روش‌های الاستیک ۲۴

۲-۳-روشهای پلاستیک ۲۶

۲-۴-روش کاستگیلیانو ۳۴

۲-۵-مدل غیرپیوسته پل های قوسی بنایی ۳۶

۲-۵-۱- مدلهای عددی موجود جهت مدلسازی مصالح بنایی ۳۷

۲-۵-۲-مدلسازی غیرپیوسته سازه های بنایی ۳۹

۲-۵-۳-مدلسازی تغییر شکل پذیری بلوکهای بنایی در روشهای غیر پیوسته ۳۹

فصل سوم : ارزیابی پلهای قوسی به روش اجزاء محدود ۴۳

۳-۱- کلیات ۴۴

۳-۲- مدلسازی سه بعدی ۵۱

۳-۲-۱- مشکلات مربوط به مدلسازی پلهای سنگی ۵۳
۳-۲-۲- روش ماکروسکوپیک ۵۳
۳-۲-۳- رفتار غیرخطی در سازه ها ۵۵
۳-۲-۳-۱- تغییر وضعیت ۵۶
۳-۲-۳-۲-رفتارهای غیرخطی هندسی ۵۶
۳-۲-۳-۳- رفتارهای غیرخطی مصالح ۵۷
فصل چهارم : آشنایی با نرم افزار اجزاء محدود ANSYS ۵۸
۴-۱- مراحل انجام آنالیز استاتیکی ۵۹
۴-۲- بدست آوردن ماتریس سازه ای ۶۰
۴-۳- حلگرهای معادلات تعادل ۶۴
۴-۳-۱- حلگر اسپارس ۶۵
۴-۴- مبانی تحلیل غیرخطی در نرم افزار ANSYS ۶۶
۴-۴-۱- روش نیوتن- رافسون ۶۹
۴-۴-۲- همگرایی ۷۳
۴-۴-۳- جستجوی خطی ۷۴
۴-۵- مشخصات المانهای مورد استفاده در تحقیق ۷۵
۴-۵-۱- نقاط تجمعی گاوسی در المان سه بعدی هشت گرهی (نقطه ۲x۲x۲) ۷۶
۴-۵-۲- توصیف المان SOLID65 ۷۶
۴-۵-۲-۱- اطلاعات ورودی SOLID65 ۷۷
۴-۵-۲-۲- اطلاعات مربوط به مصالح ترد در المان SOLID65 ۷۸
۴-۵-۲-۳- فرضیات و محدودیت های المان SOLID65 ۷۹
۴-۵-۳- مبانی تئوریک المان SOLID65 ۸۰
۴-۵-۳-۱- کلیات مربوط به رفتار خطی ۸۱
۴-۵-۳-۲- رفتار خطی مصالح ترد ۸۲
۴-۵-۳-۳- رفتار غیرخطی مصالح ترد ۸۳
۴-۵-۳-۴- مدلسازی ترک ۸۳
۴-۵-۳-۵- مدلسازی خردشدگی ۸۸
۴-۵-۴- توصیف المان SOLID45 ۸۹
۴-۵-۴-۱- فرضیات و محدودیت ها ۸۹
۴-۵-۵- المان TARGE170 ۹۰
۴-۵-۵-۱- انواع تقسیم بندی ۹۱
۴-۵-۶- المان CONTA174 ۹۲
۴-۵-۶-۱- زوجهای تماسی ۹۳

۴-۵-۶-۲- محل ایجاد تماس ۹۳
۴-۵-۶-۳- فرضیات و محدودیت ها ۹۴
۴-۶- معیار خرابی مصالح ترد در نرم افزار ANSYS ۹۴
۴-۷- مدل تسلیم دراکر – پراگر ۱۰۲
۴-۸- مدل اصطکاکی ۱۰۴
۴-۸-۱- قانون کولمب ۱۰۴
۴-۸-۲-الگوریتم متقارن سازی ۱۰۵
۴-۸-۳- روش پنالتی ۱۰۶
۴-۸-۴- روش لاگرانژ تصحیح شده ۱۰۷
فصل پنجم : تحلیل مدلهای اجزاء محدود و مقایسه با نتایج تجربی ۱۰۹
۵-۱- مشخصات مدل اجزاء محدود ۱۱۰
۵-۱-۱- شرایط مرزی ۱۱۲
۵-۲- مدل اول : پل Bridgemill ۱۱۳
۵-۲-۱- مشخصه های مربوط به حل مسأله ۱۱۸
۵-۲-۲- نتایج ۱۲۲
۵-۳- مدل دوم : نمونه آزمایشگاهی با دیوار جانبی ۱۲۸
۵-۳-۱- مشخصه های مربوط به حل ۱۳۱
۵-۳-۲- نتایج ۱۳۲
۵-۴- مدل سوم : نمونه آزمایشگاهی بدون دیوار جانبی ۱۴۰
فصل ششم : نتیجه گیری ۱۴۷
منابع ۱۵۰

فهرست اشکال

عنوان صفحه

۱-۱ : ساختمان مرسوم یک پل قوسی ۱۱
۱-۲ :تصویر استوانه ای از سطح زیرین یک قوس با زاویه انحراف ° ۴۵..... ۱۶
۲-۱ : بارگذاری جانبی (a) ستون فولادی (b) ستون بنایی (c) منحنی های پاسخ ایده آل..... ۲۶
۲-۲ : خط فشار در هنگام فروپاشی (a) ستون بنایی (b) قوس بنایی..... ۲۷
۲-۳ : مکانیسم خرابی به همراه نیروهای تعادل ۳۰
۲-۴ : روش مکانیسم..... ۳۱
۲-۵ : توزیع بار..... ۳۳
۲-۶ : مدل تحلیلی در روش کاستیگیلیانو..... ۳۶
۲-۷ : مدلهای مختلف برای مدلسازی مصالح بنایی..... ۳۸
۲-۸ : مجهولات مور استفاده در آنالیز DDA..... ۴۰
۲-۹ : ماتریس سختی کل سازه..... ۴۲
۳-۱ : رابطه تنش-کرنش فرض شده برای مصالح قوس ۴۵
۳-۲ : رینگ قوس مدل شده توسط المانهای غیر منشوری..... ۴۶
۳-۳ : حالتهای ممکن توزیع تنش و عمق موثر متناظر با آنها..... ۴۶
۳-۴ : تغییر هندسه قوس ۴۷
۳-۵ : المان مصالح پرکننده و رابطه تنش-کرنش در آن..... ۴۷
۳-۶ : توزیع فشار مصالح پرکننده بر روی رینگ قوس..... ۴۸
۳-۷ : مش بندی دو بعدی رینگ قوس و جداشدگی میان المانها برای مدلسازی ترک..... ۴۹
۳-۸ : جدا شدگی در رینگ قوس و المانهای مورد استفاده برای مدلسازی آن..... ۵۰
۳-۹ : مدل سه بعدی اجزاء محدود رینگ و دیوار جانبی یک پل قوسی..... ۵۲
۳-۱۰ : مدل سه بعدی اجزاء محدود یک پل قوسی شامل مصالح پرکننده..... ۵۲
۳-۱۱ : نمایی از یک پل سنگی قوسی..... ۵۳
۳-۱۲ : گونه های مختلف رفتار غیرخطی سازه ها..... ۵۵
۳-۱۳ : چوب ماهیگیری که نشاندهنده رفتار غیرخطی هندسی است..... ۵۷
۴-۱ : روش نیوتن رافسون..... ۶۷
۴-۲ : گامها و زیرگامهای بارگذاری در آنالیز غیرخطی..... ۶۸
۴-۳ : حل با روش نیوتن-رافسون با یک تکرار ۷۰
۴-۴ : حل با روش نیوتن-رافسون در تکرار دوم..... ۷۱
۴-۵ : پروسه افزایش بارگذاری در روش نیوتن-رافسون..... ۷۲

۴-۶ : سختی اولیه در روش نیوتن- رافسون ۷۲
۴-۷ : نقاط تجمعی برای المانهای بلوکی و هرمی شکل ۷۶
۴-۸ : هندسه المان SOLID65 ..... ۷۷
۴-۹ : ظرفیت در حالت ترک خورده ۸۴
۴-۱۰ : تبدیل جهتها در المان ۸۷
۴-۱۱ : هندسه ومشخصات المان SOLID45 ..... ۸۹
۴-۱۲ : المانهای تماس و هدف ۹۰
۴-۱۳: شکل هندسی المانهای هدف ۹۱
۴-۱۴ : انواع تقسمات سه بعدی ۹۱
۴-۱۵ : هندسه المان تماس ۹۲
۴-۱۶ : ایجاد تماس در نقاط گاوسی ۹۳
۴-۱۷ : سطح تسلیم در فضای تنشهای اصلی ۹۸
۴-۱۸ : پروفیلی از سطح تسلیم ۹۹
۴-۱۹ : سطح تسلیم در فضای تنشهای اصلی در حالت نزدیک به تنش دو محوره ۱۰۲
۴-۲۰ : سطح تسلیم دراکر- پراگر ۱۰۴
۴-۲۱ : مدل اصطکاکی ۱۰۵
۵-۱ : مدل اجزاء محدود مدل اول ۱۱۶
۵-۲ : مدل اجزاء محدود المانهای تماسی ۱۱۸
۵-۳ : تغییر شکل مدل اول اندکی قبل از فروپاشی ۱۲۲
۵-۴ : نمودار بار –تغییر مکان گرهی در زیر خط بارگذاری در مدل اول ۱۲۳
۵-۵ : الگوی ترک خوردگی مدل اول ۱۲۴
۵-۶ : الگوی توپوگرافی مربوط به جابجایی عمودی مدل اول ۱۲۵
۵-۷ : الگوی توپوگرافی مربوط به جابجایی عمودی مدل اول ۱۲۶
۵-۸ : نمودار فشار متاس بر حسب نیروی اعمالی در مدل اول ۱۲۷
۵-۹ : عکس العمل کل تکیه گاههای عمودی نسبت به نیروی اعمالی ۱۲۷
۵-۱۰ : عکس العمل تکیه گاه افقی نزدیک به نقطه بارگذاری ۱۲۸
۵-۱۱ : نمونه آزمایشگاهی از یک پل قوسی سنگی ۱۳۰
۵-۱۲ : مدل اجزاء محدود دوم ۱۳۱
۵-۱۳ : تغییر شکل مدل دوم اندکی قبل از فروپاشی ۱۳۳
۵-۱۴ : جداشدگی میان قوس و دیوار جانبی ۱۳۳
۵-۱۵ : الگوی ترک خوردگی مدل دوم از دو نمای الف)فوقانی و ب)تحتانی ۱۳۵
۵-۱۶ : الگوی توپوگرافی مربوط به جابجایی عمودی مدل دوم ۱۳۶
۵-۱۷ : نمودار بار –تغییر مکان گرهی در زیر خط بارگذاری در مدل اول ۱۳۶

۵-۱۸ : نمودار تنش ون-میسز در نقطه ای زیر خط بارگذاری در مدل دوم ۱۳۷
۵-۲۰ : عکس العمل تکیه گاهی عمودی در یک گره کناری قوس در مدل دوم..... ۱۳۸
۵-۲۱ : عکس العمل تکیه گاهی عمودی کل وارد بر سازه در مدل دوم..... ۱۳۹
۵-۲۲ : عکس العمل تکیه گاهی افقی کل وارد برسازه در مدل دوم ۱۳۹
۵-۲۳ : مدل اجزاء محدود سوم..... ۱۴۰
۵-۲۴ : تغییر شکل مدل دوم اندکی قبل از فروپاشی ۱۴۲
۵-۲۵ : الگوی ترک خوردگی مدل سوم از دو نما..... ۱۴۳
۵-۲۶ : الگوی توپوگرافی مربوط به جابجایی عمودی مدل سوم..... ۱۴۴
۵-۲۷ : الگوی توپوگرافی مربوط به تنش ون-میسز در مدل سوم ۱۴۵
۵-۲۸ : نمودار نیرو -تغییر مکان عمودی گرهی در زیر خط بارگذاری در مدل سوم.....۱۴۶
۵-۲۹ : جابجایی افقی گرهی در زیر خط بارگذاری در مدل سوم.....۱۴۶

فهرست جداول

عنوان صفحه

۴-۱ : اطلاعات مربوط به مصالح بتنی المان solid65 ..... ۷۸
۴-۲ : تعریف پارامترهای مربوط به مصالح ترد ۹۵
۵-۱ : پیشنهاد بوتبی در مورد مشخصات مکانیکی مصالح ۱۱۱
۵-۲ : مشخصات هندسی مدل اول ۱۱۴
۵-۳ : مشخصات مکانیکی در نظر گرفته شده برای مصالح بنایی (سنگ وملات) مدل اول ۱۱۵
۵-۴ : مشخصات مکانیکی در نظر گرفته شده برای مصالح پرکننده مدل اول ۱۱۵
۵-۵ : مشخصات مکانیکی در نظر گرفته شده برای سطح تماسی مدل اول ۱۱۵
۵-۶ : مشخصات مربوط به حل باری مدل اول ۱۲۰
۵-۷ : تعداد زیرگامهای حل شده برای رسیدن به نتیجه نهایی در مدل اول ۱۲۱
۵-۸ : مشخصات هندسی مدل دوم ۱۲۹
۵-۹ : تعداد زیرگامهای حل شده برای رسیدن به نتیجه نهایی در مدل دوم ۱۳۲
۵-۱۰ : تعداد زیرگامهای حل شده برای رسیدن به نتیجه نهایی در مدل سوم ۱۴۱

مقدمه

تاریخچه

باستان شناسان بر این عقیده اند که قوس ها عمری بیش از پنج هزار سال دارند. بر اساس اطلاعات به دست آمده، اولین قوسها در منطقه بین النهرین و جنوب مصر ساخته شده اند [1]. قوسهای اولیه به صورت سازه هایی از نی ساخته می شدند، بدین صورت که دسته هایی به صورت ایستاده در کنار هم برروی زمین قرار داده شده و سپس قسمت بالایی این دسته ها به هم دوخته می شدند. این روش هنوز در قسمتهایی از عراق مورد استفاده می باشد. سطح خارجی این سازه ها به وسیله لایه ای عایق مانند گل پوشانده می شده است. به مرور با پیشرفت دانش انسانها به فکر استفاده از مصالح با دوام و پرمقاومت تر افتادند و تدریجاً به جای نی از خشتهای گلی استفاده شد[2].

به احتمال قوی چینی ها اولین کسانی بوده اند که در ساخت پلهای کوچک از قوس استفاده کرده‌اند. پیشینه ساخت این گونه پلها در چین به ۲۹۰۰ سال پیش از میلاد مسیح باز می گردد[2]. ولی به طور مشخص می توان گفت که رومیها بیشترین استفاده از قوس را در سازه ها ی خود برده اند.

براساس اطلاعات به دست آمده رومیها اولین قوس را با نام (Cloaca Maxima) در سال ۶۱۵ قبل از میلاد ساخته اند. این قوس دارای سه لایه بوده است که لایه میانی آن دارای دهانه ای برابر۴/۳ متربوده است. قوس مذکور به وسیله سنگ ساخته شده بوده است. رومیها اولین پلهای قوسی را حدود دو قرن پیش از میلاد ساخته اند یکی از بزرگترین آنها پل سنگی قوسی است که در سال ۱۰۵ قبل از میلاد در(Alcantra) اسپانیا ساخته شده است. این دارای شش قوس بوده است که دهانه ای بیش از ۳۰ متر داشته اند.

همانگونه که در ابتدا ذکر شد اولین قوسها در منطقه بین النهرین به کار گرفته شده اند که نشان دهنده آن است که ایرانیان در استفاده از قوس نیز پیشگام بوده اند. آثار به جا مانده در شوش دانیال نشانگر استفاده وسیع ایرانیان از قوس در ساختمانها بوده است. همچنین می توان از بنای عظیم طاق کسری مربوط به دوره ساسانی نام برد که قدمتی نزدیک به دو هزار سال دارد. ایرانیان نیز از قوس به عنوان عناصری موّثر در پلها بهره می بردند. در استانهای خوزستان و لرستان بقایایی از چند پل قوسی

موجود است که قدمتی بیش از دوهزار سال دارند. به عنوان نمونه ای دیگر می توان پل شهرستان در شهر اصفهان را نام برد که این پل نیز به صورت قوسی ساخته شده و قدمتی بیش از دوهزار سال دارد. قوسهای مورد استفاده در ایران برخلاف اروپا عموماً از خشت و گل ساخته می شدند. نکته دیگر آن که قوسهای مذکور معمولاً به صورت نقطه ای (هشتی) اجرا می شدند. در حالی که بیشتر قوسهایی که رومیان استفاده می کردند، به صورت نیم دایره ویا دایره ناقص بود.

پایه های پلها معمولاً عریض در نظر گرفته می شدند، عرض این پایه ها حدوداً یک چهارم تا یک سوم دهانه در نظر گرفته می شده است، به صورتی که در پلهای چند دهانه هر یک از قوسها بدون اتکا به قوس کناری پایداری خود را حفظ می کردند. چنین گفته می شود که رومیان به عمد چنین کاری را انجام می دادند، زیرا که آنها مایل بودند که در زمان جنگ یک یا دو دهانه پل را خراب کنند تا مسیر مسدود شود، ولی به کل سازه پل آسیبی وارد نشود. از این رو پایه ها را به حدی عریض در نظر می‌گرفتند که هر قوس بدون اتکا به قوسهای کناری عمل کند. از نکات جالب توجه دیگر در مورد این پلها در زمانهای گذشته ایجاد باز شو در پایه می‌باشد.

بازشوها به دلایل مختلف به کار گرفته می شدند که بعضی از آنها صرفاً دلایل معماری یوده است. ولی تسهیل در عبور آب و همچنین کاهش وزن وارد بر فونداسیون ها دلایلی دیگر استفاده از بازشو در پایه پلها بودند برای اجرای پلهای قوسی ابتدا در بالادست رودخانه جلوی آب را می گرفتند، سپس زمین را تا حدی که توانایی حمل وزن پل را داشته باشد می کندند. در پایان فونداسیون را اجرا می‌کردند. جنس این فونداسیون از بتن، سنگ و... بوده است. در زمینهایی که دارای مقاومت پائین بودند از شمع استفاده می شده است. جنس این شمعها از چوب بوده است. پایه های پلها در بالا دست به صورت نوک تیز ودر پائین دست به صورت صاف اجرا می‌شدند اگر چه این حالت به عبور آب کمک زیادی می کرد، ولی باعث آبشستگی در اطراف پایه ها می شد. به جهت از سازه های هدایت کننده در کنار پایه ها به کار گرفته می شد تا عبور آب را تسهیل کرده و آبشستگی را کاهش دهند.

بر خلاف ایرانیان که از ملات برای به هم چسباندن مصالح استفاده می کردند رومیان در ابتدا به

ندرت از ملات استفاده می کردند. آنها پس از قالب بندی سنگ یا آجر را بر روی قالب ها به صورت قوس اجرا کرده و سپس مصالح پر کننده و دیوارهای جانبی را بر روی قوس اجرا می کردند. در پایان نیز قالب برداشته می شد و سیستم قوسی بدون وجود ملات انجام وظیفه می کرد. رومیها ساختن پل را امری مقدس می دانستند. از سوی امپراطور یک فرد مذهبی جهت نظارت بر امر پل سازی مأموریت می یافت که در میان مردم از جایگاه عظیمی برخوردار بود و به همین جهت مردم درساخت این پلها کمک زیادی انجام می دادند. پس از فرو پاشی امپراطوری روم ساخت پلهای قوسی تا مدتی متوقف شد. از قرن دوازدهم میلادی ساختن پلهای قوسی تحت نظر کلیسا آغاز شد. در دوره وسطی پلهای بسیاری در انگلستان و ایتالیا ساخته شدند. مهمترین پل ساخته شده در این دوره پل معروف لندن بر روی رود تایمز است که ساخت آن ۳۳ سال طول کشید و تا سال ۱۸۳۱ مورد استفاده بوده است.

دوران رنسانس دوره جدیدی در طراحی و ساخت پلهای قوسی بوده است. تحول مهم دراین دوران تغییر فرم قوس از نیم دایره به دایره ناقص بود. چراکه انتخاب شکل نیم دایره باعث محدودیت در نسبت بلندی به دهانه در قوس می شد و هر مقدار که دهانه بزرگتر می شد باید ارتفاع قوس نیز بیشتر می شد. با استفاده قوسهای دایره ناقص امکان ساخت قوسهای با نسبتهای مختلف ارتفاع به دهانه ایجاد شد. بدین ترتیب ساخت دهانه های بزرگ عملی شد و تحولی در ساخت پلهای قوسی با مصالح بنایی ایجاد شد. همچنین با پیشرفت علم امکان ساخت پلهای چند دهانه با پایه های کوچک فراهم شد .

از این نمونه پلها می توان پل (Pontevecchio) در فلورانس با دهانه ۲۶ متر و پلی در ورونا ایتالیا با دهانه ۴۱ متر و پلی با دهانه ۷۶ متر در شهر) ترزو) ایتالیا نام برد. در این دوران همچنین استفاده از قوسهایی با اشکال سهمی و بیضی نیز امکان پذیر شد. ولی به دلیل مشکلات اجرایی در ساخت آنها این شکل از قوسها فراگیر نشدند. در ایران نیز پس از ورود اسلام کار ساخت پلها ادامه یافت، ولی با توجه به طبیعت عموماً خشک مناطق ایران و کم بودن رودخانه ها تعداد آنها در مقایسه با کشورهای اروپایی کمتر بود. با این حال در دوره صفویه پلهای زیبایی ساخته شدند که می توان از پلهای برروی

زاینده رود در شهر اصفهان نام برد که این پلها هنوز کاملاً سالم و پا برجا هستند. پس از دوره صفویه به دلیل افت اقتصادی و علمی‌کشور، پل مهمی‌در ایران ساخته نشد. این امر تا ورود راه آهن به ایران ادامه داشت.

مهمترین دوره ساخت پلهای قوسی در اروپا با ساخت کانالهای آبرسانی کشاورزی در اواسط قرن هجدهم میلادی و همچنین گسترش شبکه راه آهن در اوایل قرن بیستم رخ داده است پس از جنگ جهانی پلهای کمی‌در اروپا به صورت قوسی ساخته شدند.

پلهای راه آهن معمولاً به وسیله نیروی کار محلی ساخته می شدند. گسترش سریع شبکه راه آهن باعث شد پیشرفت سریع در تکنولوژی ساخت پلهای قوسی صورت گیرد. ابعاد مصالح و ترکیب ملات ها با توجه به پیشرفتهای مهندسی و با توجه به اصول علمی به صورت استاندارد در آمدند.

در ایران پس از جنگ جهانی دوم برای ایجاد شبکه راه آهن پلهای زیادی از نوع قوسی ساخته شدند. طراحی و اجرای این پلها توسط پیمانکار بلژیکی به نام Kampsax صورت گرفته است. در ساخت این پلها معمولاً از سنگ به عنوان مصالح استفاده شده است. همچنین در شبکه راههای ایران نیز استفاده بیشماری از پلهای قوسی صورت گرفته است.

امروزه تعداد بسیار زیاد پلهای قوسی اهمیت آنها را فوق العاده نموده است. تخمین زده می شود که در کشور انگلستان حدود چهل هزار پل بزرگراهی و نزدیک به سی و سه هزار پل راه آهن به صورت قوسی بنایی ساخته شده است، که هنوز مورد استفاده می باشند.

بیشتر این پلها دارای دهانه ای نزدیک به ده متر هستند. بلندترین پل قوسی سنگی موجود در انگلستان دهانه ای به طول ۶۱ متردارد. تعداد پلهای قوسی در کشورایتالیا بیش از انگلستان می باشد. در ایران نیز تعداد پلهای قوسی بسیار زیاد است. گفته می شود که تنها در مسیر راه آهن جنوب بیش از هفت هزار پل سنگی قوسی موجود می باشد که خط آهن کشور به شدت به آنها وابسته می باشد.

با وجود اهمیت فراوان این پلها و تعداد فوق العاده زیاد آنها در کشور ما، تا به حال کمتر به صورت علمی به بررسی آنها پرداخته شده است. به خصوص اینکه به دلیل عمر زیاد، این پلها دچار آسیب

شده اند و باید ارزیابی مناسبی از وضعیت آنها صورت گیرد. همچنین به دلیل اینکه بارهای عبورکننده از روی این پلها نسبت به زمان طراحی و ساخت آنها تغییرات زیادی کرده و افزایش یافته اند و یا در آینده افزایش خواهند یافت ارزیابی ظرفیت باربری آنها برای حالت جدید امری ضروری است. نکته مهم دیگر بحث بارهای لرزه ای است که پلهای بنایی به خاطر طبیعت تردی که دارند نسبت به آن بسیار حساس هستند.

مرور ادبیات

طراحی پلهای قوسی به شیوه مدرن و تئوریک از هجدهم میلادی آغاز شد. در این دوره آزمایشهای تجربی جهت شناخت رفتار پل تحت اثر بار توسط برخی از محققین گرفتند.

قبل از قرن هجدهم طراحی پلها براساس قوانین و روابط تجربی صورت می گرفت. این روابط ضخامت قوس را به اندازه دهانه و ارتفاع قوس مرتبط می کردند. این روابط با استفاده از تجربیات گذشته در ساخت پلها به دست آمده بودند. ناویر(۱۸۲۶)[3] و بارلو (۱۸۴۶) [4] از نخستین کسانی بودند که به صورت تئوریک برخی قوانین کلی را در طراحی پلها ارائه کردند. در سال (۱۸۷۹) کاستیگیلیانو [5] تئوری حداقل انرژی را ارائه نمود و از آن در آنالیز پلهای قوسی کمک گرفت. پس از کاستیگیلیانو تلاشهای زیادی آنالیز پلهای قوسی توسط محققین مختلف صورت گرفت. با توسعه تئوری پلاستیسیته در اوایل قرن بیستم استفاده از آنالیز به روش حالت حدی مورد توجه قرار گرفت. پیپارد [6] در سال ۱۹۳۶روش استفاده مکانیسم هارا جهت آنالیز و طراحی پلهای قوسی مورد بررسی قرار داد. این روشها که به روشهای پلاستیک معروف می باشند در طول زمان توسعه زیادی یافته اند و امروز هم به عنوان یکی از متد های مهم آنالیز پلهای قوسی مورد توجه هستند.

با ابداع روش اجزاء محدود در نیمه دوم قرن بیستم این روش برای آنالیز پلهای قوسی نیز مورد استفاده قرار گرفت. امروزه با توجه به امکان استفاده کامپیوترهای قوی روشهای عددی و از جمله روش اجزاء محدود به عنوان مهمترین ابزار برای آنالیز پلهای قوسی مورد توجه قرار دارند. علاوه بر

روش اجزاء محدود با توجه به طبیعت پلهای قوسی که به صورت بلوکهای سنگی ویا آجری هستند در چند سال اخیر روش عددی دیگری با عنوان روش های مدلسازی غیر پیوسته جهت آنالیز پلها به کار گرفته شده است. پیشرفت سریع کامپیوترها و توانایی انجام محاسبات پیچیده در زمان کوتاه باعث شده است که نرم افزارهای مبتنی بر روشهای عددی با مطابقت بیشتری با رفتار واقعی این گونه سازه ها ارائه شوند و امکان ارزیابی در مورد این پلها فراهم آید. مرور ادبیات مربوط به روش اجزائ محدود در فصل چهارم ارائه شده است.

سازماندهی پایان نامه

در فصل دوم ساختمان یک پل قوسی سنگی و رفتارهای مهم سازه ای آن تشریح شده است. نحوه انتقال بار و همچنین نقش عناصر اصلی این گونه سازه ها در انتقال بار نیز در این فصل مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل سوم در مورد روش های موجود برای ارزیابی کمی پلهای قوسی و بنایی به طور خلاصه توضیح داده شده است. باتوجه به اهمیت روش مکانیسم پلاستیک توجه بیشتری به این روش صورت گرفته است و در فصل چهارم به صورت مجزا درباره کاربرد روش اجزاء محدود در ارزیابی کمی پلهای قوسی بنایی بحث شده است.

با توجه به استفاده از نرم افزار در این پایان نامه در فصل پنجم مبانی تئوریک این نرم افزار که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته اند، به صورت خلاصه شرح داده شده اند.

در فصل ششم مدل مورد استفاده در این تحقیق شرح داده شده و مدلسازی اجزاء محدود نمونه ها و نتایج بدست آمده به طور کامل شرح داده شده اند و در نهایت در فصل هفتم باتوجه به نتایج بدست آمده و نتاج تجربی نتیجه گیری صورت گرفته است.

تعیین هدف

هدف اصلی در این تحقیق ساختن مدل سه بعدی اجزاء محدودی است که به کمک آن بتوان بار خرابی یک پل قوسی سنگی را بدست آورد. بدین منظور از دیدگاه همگن سازی مصالح بنایی استفاده شده و با استفاده از نتایج تجربی پیشنهادات موجود در ادبیات مدل تجزاء محدود کالیبره می شود. با استفاده از مدل کالیبره شده می توان رفتارهای این گونه سازه ها را به هنگام خرابی پیش بینی نموده و همچنین تأثیر ایرادهایی چون جداشدگی دوار و قوس، ترکهای طولی و عرضی و... را بر روی ظرفیت نهایی سازه بدست آورد. همچنین می توان این مدل را برای بررسی رفتار سازه قوسی تحت بار سرویس به کار برد. لازم به تذکر است که در مدل اجزاء محدود مورد بحث اثراتی همچون ترک خوردگی و خردشدگی مصالح بنایی، رفتار پلاستیک مصالح پرکننده و لغزش میان مصالح پرکننده و مصالح بنایی در نظر گرفته می شوند. لذا آنالیز انجام شده در این تحقیق غیرخطی خواهد بود.