بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی عمران
گروه سازه‌های هیدرولیکی

بررسی روش های تحلیل استاتیکی و دینامیکی خطی و غیر خطی پلهای سنگی قوسی تحت بارهای عادی و زلزله

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران

مهدی تیکنی

استاد راهنما:
دکتر محمد تقی احمدی

اردیبهشت ۱۳۸۸

تقدیم به امام رئوف

امام علی ابن موسی الرضا(ع)

بسم رب الشهداء و الصدیقین

خدای منان را سپاسگزارم که آمیزه ای از استعداد و پشتکار را در وجودم در آمیخت و تا امروز آنچنان مرا غرق در نعمت هایش کرد که توان شکر و سپاس این همه نعمت را ندارم.

بعد از حمد و ثنای الهی بنا به فرموده آن مهربان، کمال تشکر و قدردانی را از پدر و مادر مهربانم دارم که در طول این سالیان همیشه پشتوانه بزرگ زندگی ام بوده اند.

همچنین در اینجا بر خود لازم می دانم از زحمات استاد گرانقدرم، جناب آقای دکتر احمدی، و همه اساتید و معلمانم کمال تقدیر و تشکر را ابراز دارم، برای همه آنها آرزوی سلامتی و شادکامی دارم.

در پایان یاد و خاطره همه آنان که گفتند تا بدانیم و رفتند تا بمانیم را گرامی می‌دارم.

با امید به آنکه نتایج تحقیق جاری بتواند مقدمه ای باشد برای حل یکی از مشکلات موجود در کشور عزیزمان ایران.

چکیده

پلهای قوسی یادگاری است از مهندسین قدیمی که هنر خود را در ساخت این نوع پلها در طول سالیان دراز به نمایش گذاشته اند. در شبکه راه آهن ایران حدود ۳۳۰۰ پل سنگی قوسی در حال خدمت رسانی است. بعضی از این پلها نقش بسیار کلیدی و حیاتی را در سیستم ریلی کشور دارند. باتوجه به اهمیت و تعداد این پلها در کشور لازم است تا بارگذاری‌های بحرانی برای این پلها مشخص و مطابق آن شرایط پلها بررسی شود.

در این تحقیق با توجه به اهمیت میزان باربری این پل ها بعد از گذشت سالیان طولانی از زمان ساخت و افزایش بارهای ثقلی در ابتدا به مرور دیدگاه ها و روش‌های مختلف (بغیر از روش المان مجزا) در زمینه مدلسازی پلهای قوسی پرداخته شده است. محققین نظریات مختلفی را در مورد رفتار خطی ویا غیرخطی این پلها دارند. با جمع بندی نظریات محققین مختلف مدل اجزای محدودی پیشنهاد شده که در آن سعی شده جزییات موجود در این پلها به خوبی در نظرگرفته شود. در این مدل از المان های درز در طول قوس به عنوان محل های احتمالی ترک و بین قوس و مصالح پرکننده استفاده شده است. مدلسازی بصورت ۲بعدی و۳ بعدی انجام شده است.

در مدل جامع دو بعدی و سه بعدی پیشنهادی قابلیت اعمال انواع بارگذاری ها از جمله بارگذاری لرزه‌ای وجود دارد. مقایسه نتایج مدل ۲ بعدی و۳ بعدی نشان می‌دهد که در مدل ۲بعدی با توجه به عدم در نظرگرفتن دیوارهای سنگی دوطرف تغییرمکان ها و بازشدگی در درزها بیشتر می باشد. همچنین نتایج تحلیل پل تحت بار زلزله که بسیار کم مورد توجه محققین قرار گرفته، نشان از عملکرد خوب این پلها در برابر زلزله در راستای طولی پل دارد ولی پل تحت زلزله عرضی عملکرد ضعیف تری را نشان می‌دهد و امکان خرابی دیوارهای پیشانی در این حالت وجود دارد.

کلمات کلیدی: پلهای قوسی، مصالح بنایی، روش اجزای محدود

فهرست

فصل ۱ مقدمه

۱

۱ - ۱ کلیات ۱

۱ - ۲ موضوع تحقیق و ساختار پایان نامه ۲

فصل ۲ معرفی کلی پلهای قوسی ۳

۲-۱ مقدمه ۳

۲-۲ اجزای مختلف ومهم پلهای قوسی ۳

۲-۳ انواع قوس در پلهای قوسی ۵

۲-۴ مروری بر پلهای ایران و جهان ۷

۲-۵ دستورالعمل های قدیمی‌در مورد پل های قوسی ۱۴

۲-۵-۱ضخامت قوس ۱۴

۲-۶ مروری بر اطلاعات آماری ۱۷

۲-۷ عوامل خرابی در پلهای قوسی ۱۹

۲-۷-۱نشست تکیه گاهها ۱۹

۲-۷-۲سیلاب ها ۱۹

۲-۷-۳ زلزله ۲۰

۲-۷-۴ عدم عایق بندی و سیستم زهکشی مناسب ۲۰

۲-۷-۵ کم دوام بودن مصالح مصرفی ۲۰

۲-۸ بارگذاری پل های راه آهن(بخش دوم نشریه شماره ۱۳۹) ۲۱

۲-۸-۱ بارهای دائمی ۲۱

۲-۸-۲ بارهای بهره برداری ۲۲

۲-۸-۲-۱ بارهای زنده ۲۲

۲-۸-۲-۲ نیروی ترمز و شتاب ۲۲

۲-۸-۳ اثر جریان آب و غوطه وری ۲۲

۲-۹ مروری بر آئین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن در برابر زلزله ۲۳

۲-۹-۱ حدود کاربرد ۲۳

۲-۹-۲ ضوابط کلی ۲۳

۲-۹-۳ گروه‌بندی پل‌ها بر حسب اهمیت ۲۳

۲-۹-۴ محاسبه نیروهای زلزله ۲۴

۲-۹-۴-۱ روش تحلیل استاتیکی معادل ۲۴
۲-۹-۴-۲ روش تحلیل دینامیکی پل‌ها ۲۵
۲-۹-۴-۲-۱ روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی ۲۵
فصل سوم مروری بر روشهای مدلسازی پلهای قوسی ۲۶
۳-۱مقدمه ۲۶
۳-۲ مروری بر روش های مبتنی بر آنالیز حد نهایی در پلهای قوسی ۲۶
۳-۲-۱ خط رانش در قوس ۲۷
۳-۲-۲تعداد مفصل لازم برای تشکیل مکانیسم ۲۸
۳-۳مروری بر نتایج تحقیقات لورنکو ۲۹
۳-۴آنالیز حدنهایی مورد استفاده در نرم افزار Ring ۳۴
۳-۵ مدلسازی به کمک اجزای محدود ۳۶
۳-۵-۱-Hatzigeorgiou (۱۹۹۹) ۳۷
۳-۵-۱-۲ آنالیز دینامیکی الاستیک و غیر الاستیک پل ARTA ۳۸
۳-۵-۲-Thomas E.Boothby(۲۰۰۱) ۳۹
۳-۵-۳-G.Frunzio و M.Monaco(۲۰۰۱) ۴۰
۳-۵-۴-Dorospoulos(۲۰۰۶) ۴۲
۳-۵-۵-Antonio Brencich(۲۰۰۷) ۴۲
۳-۶ جمع بندی ۴۴
فصل چهارم نتایج کاربردی از رفتار پلهای قوسی از دیدگاه محققین ۴۶
۴-۱ مقدمه ۴۶
۴-۲ تاثیر سیلاب بر باربری پلهای قوسی ۴۶
۴-۳ اثر خستگی در پلهای قوسی ۴۹
۴-۴ اثر هندسه پل قوسی بر میزان بار نهایی ۵۲
۴-۴-۱ نتایج مطا لعات پارامتریک هندسه قوس ۵۳
۴-۴-۲ نشست در تکیه‌گاه‌های پل‌های قوسی ۵۷
۴-۵ جمع بندی ۶۰
فصل پنجم معرفی مدل پیشنهادی برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی ۶۲
۵-۱ مقدمه ۶۲
۵-۲ علل غیرخطی شدن رفتار سازه ها ۶۲
۵-۲-۱- تغییر شرایط مرزی اولیه ۶۲
۵-۲-۱-۱ استفاده از المان درز ۶۲
۵-۲-۲ مصالح غیرخطی ۶۵

۵-۲-۲-۱مدل رفتاری مصالح قوس و مصالح پرکننده ۶۵
۵-۳ حل معادلات تعادل استاتیکی ۶۶
۵-۴ فرضیات حل در حالت دینامیکی ۶۷
۵-۴-۱ روش انتگرال گیری زمانی معادلات حرکت ۶۸
۵-۵ روش حل دستگاه معادلات غیرخطی ۶۹
۵-۶ مدلسازی پل Prestwood ۷۱
۵-۶-۱ مطالعات پارامتریک ۷۶
۵-۷ مدلسازی پل سکوی لشکر ۸۱
۵-۷-۱آنالیز استاتیکی پل سکوی لشکر در حالت ۲ بعدی ۸۳
۵-۷-۲ تحلیل استاتیکی معادل پل سکوی لشکر ۸۸
۵-۸ آنالیز دینامیکی در حالت دو بعدی ۹۰
۵-۸-۱آنالیز تاریخچه زمانی پل پرستوود تحت زلزله northridge1 ۹۰
۵-۸-۱-۱تعیین مقادیر αوβ ۹۱
۵-۸-۱-۲ بررسی نتایج آنالیز دینامیکی ۹۲
۵-۸-۲ آنالیز تاریخچه زمانی پل سکوی لشکر تحت زلزله northridge1 ۹۵
۵-۸-۲-۱ نتایج آنالیز دینامیکی مدل دوبعدی پل سکوی لشکر ۹۶
۵-۹ مدلسازی ۳ بعدی پل سکوی لشکر ۱۰۲
۵-۹-۱ آنالیز دینامیکی پل سکوی لشکر در حالت ۳ بعدی ۱۰۵
۵-۹-۱-۱ نتایج آنالیز دینامیکی مدل ۳ بعدی پل سکوی لشکر تحت زلزله northridge1 ۱۰۶
۵-۹-۱-۲آنالیز دینامیکی پل سکوی لشکرتحت زلزله دومولفه ایcoyote lake ۱۱۰
۵-۹-۱-۲-۱ نتایج تحلیل دینامیکی در راستای طولی ۱۱۱
۵-۹-۱-۲-۲ نتایج آنالیز دینامیکی در راستای عرضی ۱۱۲
۵-۱۰بررسی شرایط پل سکوی لشکر تحت سیلاب ۱۱۶
۵-۱۱ جمع بندی ۱۱۸
فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات **۱۲۰**
منابع و مراجع **۱۲۳**

فصل ۱

مقدمه

۱- ۱ کلیات

پل های قوسی با مصالح سنگی تلفیقی مهندسی است که در آن علاوه بر نکات سازه ای ، زیبایی و چشم نوازی سازه نیز در نظر گرفته می شود.

از سال هاپیش در جای جای جهان پل های قوسی زیادی با مصالح بنایی ساخته شده است .

شبکه راه آهن ایران دارای بیش از۲۱۰۰۰ پل از انواع فلزی، بتنی، قوسی سنگی و بتنی می باشد. فراوانی پلهای قدیمی و موقعیت آنها در مسیر راه آهن سبب می شود جایگزینی آنها بسیار پرهزینه و مشکل شود. در این میان حدود۳۳۰۰ پل قوسی سنگی در سیستم ریلی ایران در حال بهره برداری می باشد.

تصمیم گیری در مورد این تعداد پل نیاز به مطالعه و بررسی دقیق و قابل اطمینانی دارد.با افزایش روز افزون بارهای وارد برپلها ،حجم ترافیک ،سرعت حرکت قطارها و...، ایمنی و ظرفیت آنها در برابر بارهای ثقلی مورد سوال است و از اینرو بررسی و برآورد ظرفیت آنها در برابر بارهای وارده از اهمیت بالایی برخوردار است.نگرانی در مورد عملکرداین پلها در برابر بارهای ثقلی و لرزه ای با بروز آثار تخریب نظیر ترکها ،خوردگی ها و پوسیدگی اجزای سازه افزایش می یابد.

دوروش مکانیسم و MEXE ،روش های معمول مورداستفاده کنونی درادبیات پل های قوسی بامصالح بنایی است که به تفصیل در سمینار به آن اشاره شده است این روشها کاربردزیادی درتخمین اولیه بارنهایی پل های قوسی دردنیا دارند.ایراد وارده براین دوروش آنست که درروشهای مذکور فقط بارهای مرده وزنده مدنظر قرار می‌گیرند و هیچ بار افقی شامل بارهای زلزله و یا بارهای ناشی از ترمز در این روشها قابل تصور نیست وهمچنین تقریب هایی درمحاسبه بارنهایی پل وارد می شود.روش دیگر مورد استفاده در تحلیل پلهای قوسی، استفاده ازمدلسازی به کمک روشهای اجزای محدود می باشدکه دراین روش امکان بارگذاری های مذکور وجود دارد. اگرچه مقالات مختلف ارایه شده در موضوع پل های قوسی با مصالح بنایی حتی در استفاده از روش اخیر نیز فقط بارهای قائم را مورد بحث قرار داده اند و محققین درصدد آن بوده اند تا روش و نحوه مدلسازی خود را با روش های قوی و قدیمی مکانیسم و MEXE مقایسه کنند.

۱-۲موضوع تحقیق و ساختار پایان نامه

تاکنون روش های مختلفی برای تعیین نحوه عملکرد پلهای قوسی ارائه شده است ولیکن تا امروز روشی که از نظر همه پذیرفته شده باشد موجود نیست.هدف از این تحقیق علاوه بر معرفی روشهای مختلف تحلیل پلهای قوسی، معرفی مدل اجزای محدود جامعی است که بتواند بخوبی رفتار پلهای قوسی تحت بارهای مختلف بویژه بارهای ثقلی و زلزله را نشان دهد.

در فصل دوم درابتدا تعدادی از پلهای قوسی موجود در ایران وجهان معرفی شده‌اند. سپس دستورالعمل های تاریخی طراحی پلها و همچنین خرابی های معمول در این پلها مرور شده است تا با دید مناسب نسبت به روابط طراحی و پلهای موجود مدلسازی انجام گیرد. در فصل سوم روش‌ها و دیدگاه‌های محققان مختلف در مورد مدلسازی پلهای قوسی مورد بحث قرار گرفته است. در فصل چهارم نتایج کاربردی دیگر محققین در باب رفتار و عملکرد پلهای قوسی ارائه شده است، اثر سیلاب و بارگذاری سیکلی به طور مختصر بحث شده است، ودر ادامه به طور مختصر مطالعات پارامتریک یکی از محققین در مورد هندسه قوس آورده شده است. در فصل پنجم در ابتدا فرضیات اصلی مدلسازی پیشنهادی تشریح شده و سپس چند نمونه مدل تحت بارگذاری های مختلف استاتیکی و دینامیکی مورد بحث قرار گرفته است، همچنین مطالعه پارامتریکی در مورد خصوصیات مکانیکی مصالح مختلف ارائه شده است. در پایان نیز نتایج مدل ۲ بعدی و ۳ بعدی باهم مقایسه شده و مواردی که مدلسازی ۳ بعدی در آن‌ها لازم است مشخص شده است.

درکشورما چه برای بارهای قائم وچه برای بارزلزله کار آنچنان قابل توجهی صورت نگرفته است وکارهای انجام شده را دردوطبقه میتوان تقسیم بندی کرد:

یکی تست های بارگذاری درمحل می‌باشدکه توسط مرکز تحقیقات راه آهن پشتیبانی شده وتاکنون تعدادی ازآن ها انجام شده است، عموم پلهای آزمایشی از قوس با بتن غیرمسلح ساخته شده است[۷] ودیگری پیش نویس آیین نامه‌ایست که برای روش ارزیابی آسیب‌پذیری پل های قوسی دربرابر زلزله توسط کمیته تخصصی پل تهیه شده است.

امید است که تحقیق جاری بهانه‌ای برای شروع فعالیت های گسترده درزمینه پل های قوسی و ارزیابی صحیح و واقع بینانه باربری این پل‌ها باشد.

فصل ۲
معرفی کلی پلهای قوسی

۲-۱ مقدمه

پلهای قوسی موجود در ایران و دیگر کشورها نقش بسیار موثری را در سیستم ریلی ایفا می‌کنند. در این فصل در ابتدا به اجزای مختلف پلهای قوسی و انواع قوس ها پرداخته شده است، در ادامه تعدادی از پلهای قوسی موجود ایران و جهان به اختصار معرفی شده اند.
بعد از آن دستورالعمل های قدیمی‌طراحی پلهای قوسی ارائه شده است و در ادامه عوامل خرابی پلهای قوسی بحث شده است. در پایان فصل بخش هایی از آیین نامه‌های مرتبط با پل در ایران آمده است.

۲-۲ اجزای مختلف ومهم پلهای قوسی

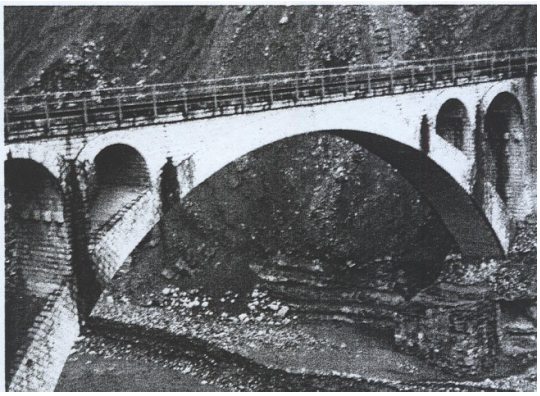
پلهای قوسی دارای بخش های مختلفی می‌باشد که در ادامه تنها به معرفی کوتاهی از ۴ بخش اصلی آن پرداخته می‌شود:

- ✓ قوس اصلی[1]: قوس به عنوان عضو باربر سازه حساب می‌شود و عموما از مصالحی با خصوصیات مکانیکی مطلوب ساخته می‌شود. عموما قوس ها به دو دسته تقسیم می‌شوند، دسته اول قوس هایی هستند که از یک رینگ اصلی تشکیل شده اند و دسته دوم قوس هایی که با چند رینگ روی هم ساخته می‌شوند.در شکل۲-۱ تفاوت این دو نوع قوس مشخص است.

شکل ۲-۱ قوس چند رینگ و یک رینگ

[1] Ring

- ✓ دیوارهای پیشانی[1]:دیوارهای سنگی که در دو طرف پل و عمود به جهت جریان قرار دارند و در واقع نگهدارنده مصالح پرکننده روی قوس می‌باشند. در بعضی از پلها دیوارهایی مشابه دیوارهای پیشانی و به موازات آنها در درون قوس ساخته می‌شود که موجب سخت تر شدن قوس اصلی می‌شود. در پلهایی که دهانه‌های بزرگی دارند عموما برای سبک کردن سازه از دیوارهای پیشانی باز استفاده می‌کنند، این بازشدگی ها علاوه بر سبک کردن بار روی قوس، امکان عبور راحت تر سیلاب را هم فراهم می‌کنند(شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲ پل کشور با دیوارهای پیشانی باز [۳۸]

- ✓ مصالح پرکننده[2] :از مصالح مختلفی به عنوان مصالح پرکننده استفاده می‌شود ،گرچه عملکرد سازه ای در تحمل بارها برای این قسمت از سازه در نظر گرفته نمی‌شود ولی استفاده از مصالح مناسب باعث توزیع بارهای متمرکز اعمالی بر روی پل می‌شود، همچنین اصطکاک و چسبندگی بین سطح بیرونی قوس و مصالح پرکننده در میزان باربری پل تاثیرگذار می‌باشد. همانطور که در قسمت قبل هم ذکر شد، بعضا برای سبک کردن سازه از قوس های کوچکتر در درون قوس استفاده می‌کنند، در بعضی پلها دیوارهای پیشانی یکدست ساخته شده و به نظر می‌رسد که مصالح پرکننده کاملا درون پل را پر کرده اند، ولی در بعضی پلها مانند شکل۲-۳ فضاهای خالی در درون پل برای سبک کردن آن در نظر گرفته می‌شود.

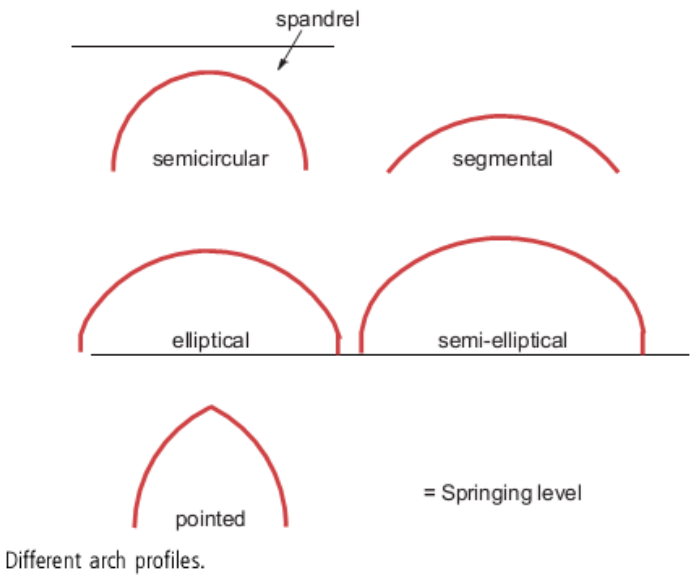
[1] spandrel wall
[2] Fill material

شکل ۲-۳ فضاهای خالی داخل پل برای سبک کردن سازه

- ✓ پایه‌ها: اصولا در پلهای چنددهانه بطور مشخص برای پل پایه‌هایی قابل تعریف می‌باشد و عموما در این نوع پلها برای جلوگیری از آبشستگی ،در جلوی پایه‌ها از آب شکن استفاده می‌شود.

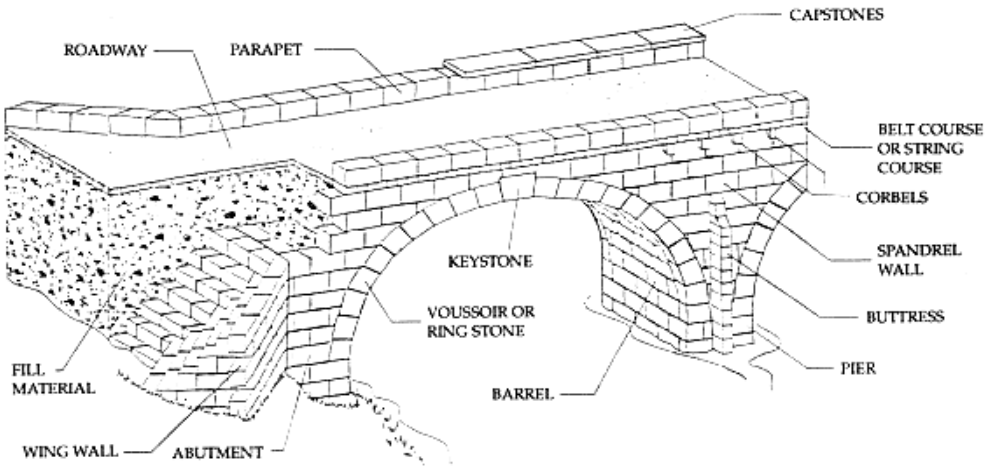
۲-۳ انواع قوس در پلهای قوسی

در شکل زیر پروفیل انواع قوس‌هایی که در پل‌های قوسی مورد استفاده قرار می گیرند قابل مشاهده است.

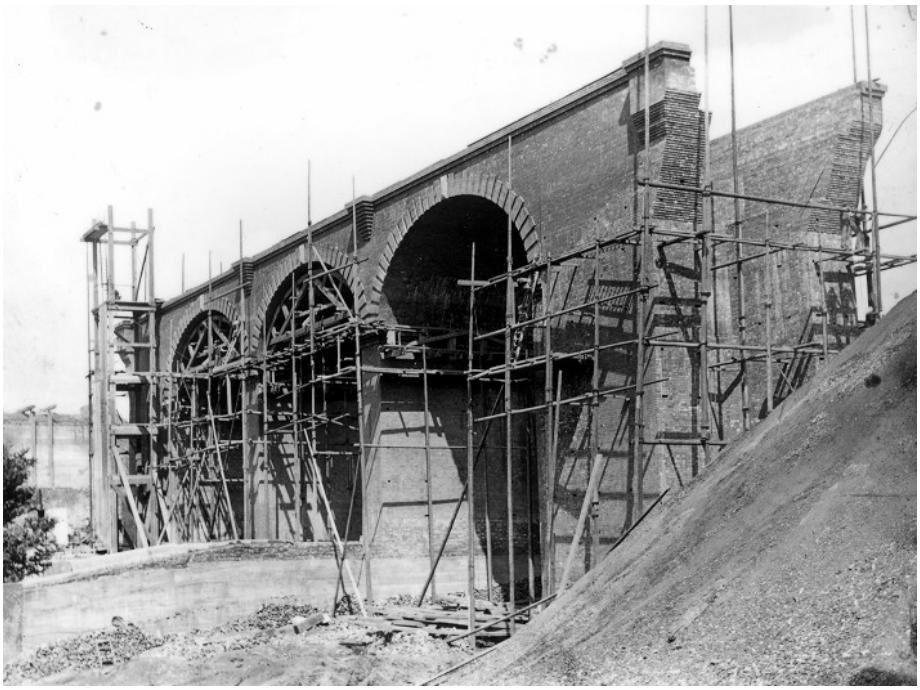


شکل ۲-۴ انواع شکل قوس

در شکل فوق قوس های نیمدایره ی کامل، قسمتی از نیمدایره، بیضی و سهمی‌قابل مشاهده است. در قسمت ۲-۴ نمونه‌هایی از هرکدام از موارد فوق آورده شده است. در شکل ۲-۵ اجزای مختلف یک پل قوسی قابل مشاهده است، همچنین در شکل ۲-۶ این اجزاء در یک پل واقعی در مراحل نهایی ساخت قابل مشاهده است.



شکل ۲-۵ اجزای مختلف یک پل قوسی

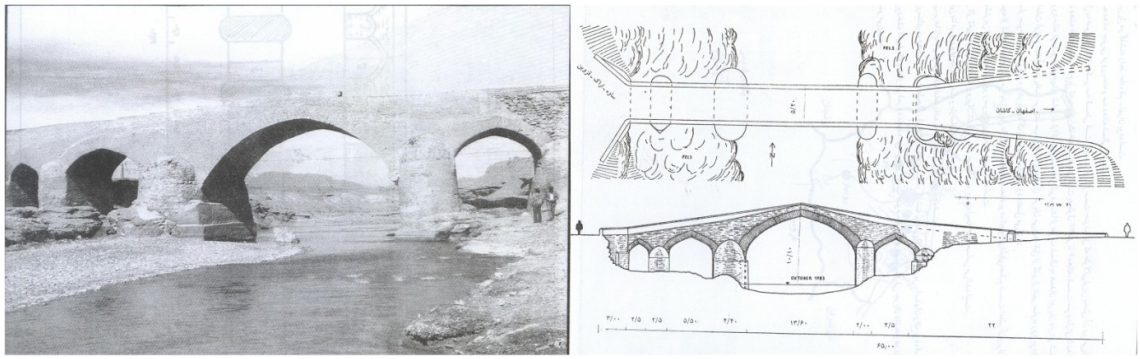


شکل ۲-۶ نمونه واقعی از اجزای درحال ساخت یک پل قوسی چند دهانه

۲-۴ مروری بر پلهای ایران و جهان

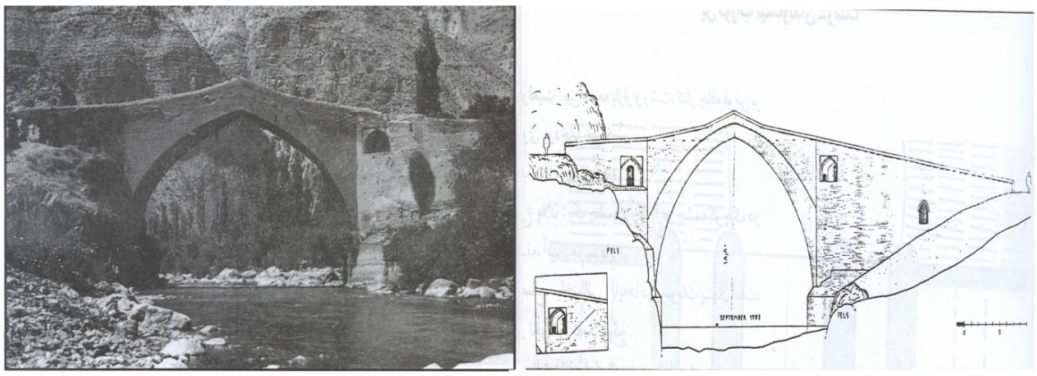
بطورکلی می‌توان پلهای قوسی موجود در کشور را از نظر زمان ساخت به دو دسته اصلی تقسیم نمود. دسته اول پلهایی هستند که عموما در دوره صفویه ساخته شده و تعداد زیادی از آن ها در کشور باقی است. این پلها به عنوان میراث فرهنگی از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشند. عموم این پلها برای عبور از روی رودخانه در درون شهرها و یا در دروازه‌های ورودی شهر ساخته شده اند. عموما دارای تعداد زیادی دهانه ی کوچک می‌باشند اگرچه تا دهانه‌های ۲۰ متری نیز در بین آنها مشاهده می‌شود. مصالح بکار رفته در این پلها عموما آجر می‌باشد اگرچه پایه‌ها در اکثر موارد سنگی است. در شکل های۲-۷ تا ۲ -۱۱ نمونه‌هایی از این نوع پلها قابل مشاهده است.

شکل۲-۷ نمایی از پل دودهک را نشان می‌دهد، این پل در دوره صفوی احداث شده و در دوره قاجاریه تعمیراتی در آن صورت گرفته است. ارتفاع دهانه اصلی پل حدود ۱۰ متر و طول دهانه آن برابر ۱۳/۶ متر می‌باشد. مصالح مورد استفاده در پایه‌ها سنگ لاشه می‌باشد. قوس و دیوارهای آن با آجر و ملات گچ ساخته شده است.[۳۷]



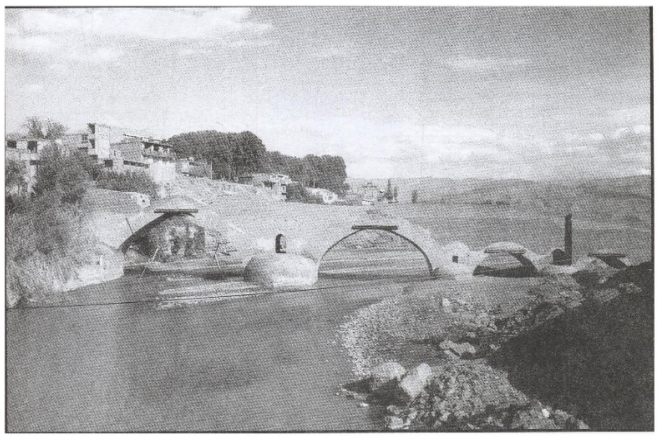
شکل ۲-۷ پل دودهک در دلیجان [۳۷]

شکل ۲-۸ نمای پل انبوه در رودبار را نشان می‌دهد که دارای دهانه ای بزرگتر از ۲۰ متر می‌باشد، ارتفاع تاج قوس تا سطح زمین حدود ۱۹ متر می‌باشد. مصالح بکاررفته در پل انبوه نیز مانند پل دودهک می‌باشد. به نظر می‌رسد که پل مذکور در زلزله سال ۶۹ رودبار تخریب شده است اما اطلاعاتی در مورد نوع خرابی های بوجود آمده در پل موجود نمی‌باشد.



شکل ۲- ۸ پل انبوه در رودبار [۳۷]

در شکل ۲-۹ و ۲-۱۰ نمایی از پل لوشان در قبل و بعد از زلزله رودبار قابل مشاهده است. تحت زلزله که احتمالا عمود بر راستای طولی پل واقع شده است، دیوارهای پیشانی دوطرف آسیب های جدی دیده است.



شکل ۲- ۹ پل لوشان در لوشان [۳۷]

شکل ۲- ۱۰ پل لوشان در لوشان بعد از زلزله رودبار [۴۲]

شکل ۲-۱۱ نمایی از پل سنگی تبریز می‌باشد که بنای آن در دوره قاجار ساخته شده است. پل دارای ۴ دهانه ۷ متری و پایه‌هایی با عرض ۱/۹ متر می‌باشد.

شکل۲-۱۱ پل سنگی در تبریز [۳۷]

پل میر بهاء الدین در زنجان هم یکی دیگر از این نوع پلهاست دهانه قوس اصلی پل ۱۴/۲ متر می‌باشد، پل از مصالح آجری ساخته شده است.

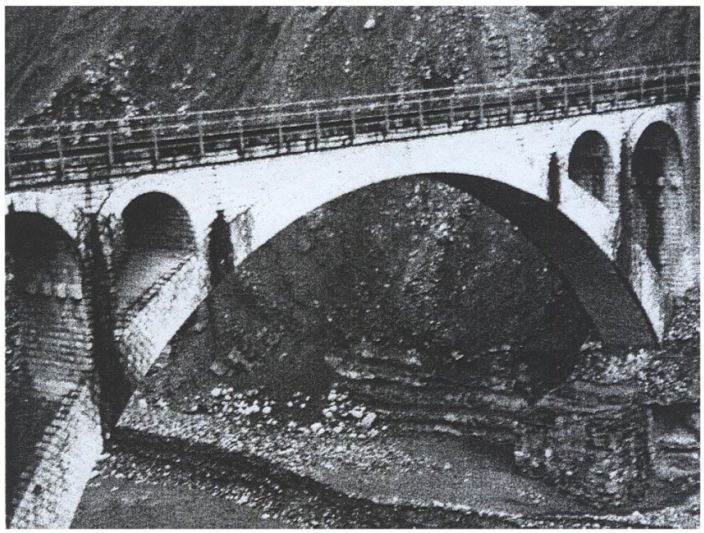
شکل۲-۱۲ پل میربهاء الدین در زنجان [۳۷]

نمونه پلهای فوق در جای جای کشور بسیار زیاد است و عموما از عبور و مرور وسایل سنگین از روی آن پلها خودداری می‌شود، چراکه ظرفیت باربری آن ها محدود بوده و بعد از گذشت سالها از ساخت آن ها، اکنون بعنوان میراث فرهنگی ایران به حساب می‌آید.

معروفترین نمونه این پلها پلهای احداث شده برروی زاینده رود در اصفهان می‌باشد. در شکل۲-۱۳ نمای زیبایی از پل خواجو در اصفهان قابل مشاهده است.[۳۷]

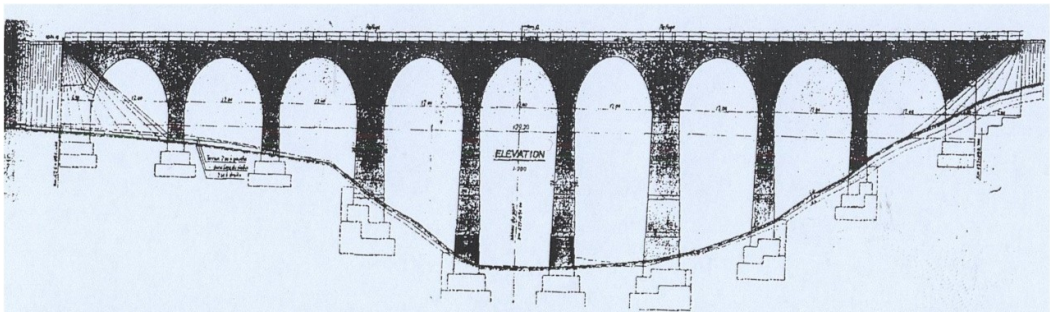
شکل۲-۱۳ پل خواجو در اصفهان

دسته دوم پلهایی هستند که اکثرا در حدود سالهای ۱۳۰۰ تا ۱۳۲۰ هجری شمسی و برای احداث خطوط راه آهن ایران، توسط شرکت های اروپایی طراحی و ساخته شده است. این پلها عموما بر روی دره‌های عمیق ساخته شده اند و دارای دهانه‌هایی تا بیش از ۴۰ متر می‌باشند. این پلها بعد از گذشت ۶۰ سال از عمرشان همچنان در سیستم ریلی کشور نقش مهمی‌را ایفا می‌کنند و جایگزینی بعضی از آن‌ها بسیار مشکل است. از این نمونه می‌توان به پلهای کشور، شباندر، سکوی لشکر، چمسنگر و پل صالح حمید اشاره کرد. مصالح بکار رفته در این پلها عموما سنگهای مرغوبی است که دارای مقاومت فشاری بالایی می‌باشند. در شکل های ۲-۱۴ تا ۲-۱۷ نمونه‌هایی از این نوع پلها قابل مشاهده است.
در شکل۲-۱۶ نمایی از پل کشور دیده می‌شود، این پل در خط آهن لرستان واقع شده و طول دهانه آن ۴۰ متر می‌باشد، ضخامت قوس آن بین ۱/۴ تا ۲/۵ متر می‌باشد.



شکل۲-۱۴ پل کشور در لرستان [۳۷]

در شکل ۲-۱۵ نمایی از نقشه پل شباندر مشاهده می‌شود، این پل مشابهت زیادی به پلهای موجود در کشورهای اروپایی دارد.

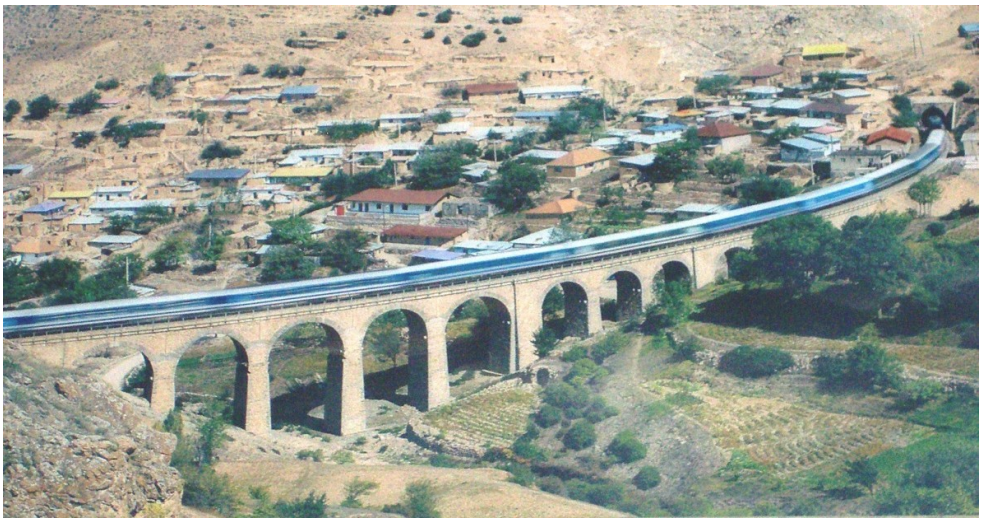


شکل۲-۱۵ پل شباندر در خط آهن لرستان [۳۷]

پل دارای ۹ دهانه ۱۲ متری می‌باشد.طول پل ۱۴۶/۵ متر و عرض آن ۴/۴ متر می‌باشد. قوس با بلوک‌های سنگی اجرا شده است و اتصال قطعات سنگی با ملات سیمانی صورت گرفته است. مصالح پرکننده قوس ها بتنی است که در رفتار بهتر پل بسیار تاثیر گذار است.[۳۷]

نمونه‌های دیگری نیز از این نوع پلها در سیستم ریلی کشور وجود دارد که در شکل های ۲-۱۶و۲-۱۷ قابل ملاحظه است.

شکل۲-۱۶ پل صالح حمید در لرستان



شکل۲-۱۷ یکی از پلهای موجود در سیستم ریلی کشور

پلهای مشابه پلهای فوق در اروپا نیز بسیار زیاد است، بعنوان نمونه در شکل‌های ۲-۲۰ و۲-۲۱ پلهایی از این دست قابل ملاحظه است.

یکی از قدیمی‌ترین پلهای قوسی جهان پل آنجی در چین می‌باشد که ۱۴۰۰ سال قدمت دارد. طول دهانه این پل ۳۷ متر بوده و ارتفاع آن در مرکز ۷/۲۳ متر می‌باشد. ضخامت قوس در تاج حدود ۱متر می‌باشد که در کناره‌ها بیشتر می‌شود. همچنین در دیوارهای کناری آن قوس های کوچکی برای سبک کردن بار روی قوس و عبور سیلاب در نظر گرفته شده است.