

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری

پایان نامه کارشناسی ارشد

مقایسه فنی و اقتصادی میان انواع روش های مرسوم بهسازی لرزه ای پل های طاقی سنگی راه آهن

استاد راهنما:

آقای دکتر محمد قاسم سحاب

استاد مشاور:

آقای مهندس روح الله تقی زاده

دانشجو:

سید محمد رضا میرعارفین

زمستان ۱۳۹۵

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب سید محمد رضا میرعارفین به شماره دانشجویی ۹۳۳۱۲۱۰۰۹ دانشجوی رشته مهندسی عمران گرایش سازه متعهد می شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه تفرش بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه تفرش می باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه تفرش ممنوع است .

نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

سید محمد رضا میرعارفین

تشکر و قدردانی

با حمد و ثنای بی حد بر آستان بی همتای احدیت که در کمال رافت و در نهایت عطوفت توان اتمام این پایان نامه را به اینجانب عطا فرموده است و با سپاس فراوان و تشکر از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر سحاب و جناب آقای مهندس تقی زاده که با کمال متانت و شکیبایی از آغاز تا پایان این تحقیق اینجانب را مشمول راهنمایی های بی شائبه خود قرار داده و در همه حال با گشاده رویی و حوصله مرا پذیرا بوده اند.

چکیده

در زندگی اجتماعی بشر، پل های احداث شده نمادی از تلاش انسان برای غلبه بر ناهمواری های طبیعی و ایجاد راه- های ارتباطی سریعتر به منظور رفت و آمد و حمل و نقل کالا شناخته می شود. در کشور ایران نیز به دلیل قدمت تاریخی آن، ما شاهد پل هایی هستیم که از زمان احداث آنها قرن ها می گذرد. تا قبل از ورود مصالح نوین نظیر فولاد و بتن، ماده سازنده اغلب بناها ازجمله پل ها، مصالح سنتی موجود در هر محل بود که از جمله رایج ترین این مصالح سنتی، سنگ و خشت می باشد. ماهیت این مصالح که دارای مقاومت فشاری مناسب و مقاومت کششی ناچیز هستند، فرم های خاص سازه ای را در ساخت بناهای ساخته شده با این مصالح رواج داده است. یکی از معمول ترین فرم های سازه ای که در بسیاری از بناهای قدیمی و ازجمله پل های قدیمی مشاهده می شود، فرم قوسی شکل است. قوس از آنجاییکه می تواند بارهای وارده به خود را فقط با عملکرد فشاری تحمل کند، فرم سازه ای ایده آل برای بناهای ساخته شده از مصالح بنایی و سنتی است. نکته قابل توجه در اینجا این است که، کلیه سازه ها و از جمله پل های ساخته شده از مصالح سنتی، از آنجاییکه در طول عمرشان در معرض عوامل محیطی و خرابی های گوناگونی قرار گرفته اند، از ریسک خرابی بالایی برخوردار بوده و می بایستی به نحوه رفتار و عملکرد آنها توجه نمود. لزوم توجه به سازه های قدیمی به ویژه پل ها از چند منظر قابل بررسی است؛ که از جمله می توان به ۱- این بناها بعضاً به عنوان میراث فرهنگی یک منطقه یا یک کشور به حساب آمده و علاوه بر تاثیرات فرهنگی، از منظر اقتصادی نیز به عنوان عامل جذب گردشگر بسیار موثر هستند و آسیب ها و خرابی های وارده به آنها می تواند زیان های جبران ناپذیری به بار آورد. ۲- زلزله خیز بودن ایران و ضعف مصالح سنتی در مقاومت در مقابل بارهای جانبی ۳- اینکه هنوز تعدادی از این پل های قدیمی در شبکه حمل و نقل جاده ای یا ریلی ایران مورد استفاده قرار می گیرند.

با توجه به اهمیت مطالعه و بررسی پل های ساخته شده از مصالح بنایی و اینکه انجام مطالعات میدانی بر روی این بناها بسیار دشوار، پرهزینه و بعضاً غیرممکن است و با توجه به پیشرفت هایی که در علوم رایانه ای و محاسباتی انجام شده و ارائه نرم افزارهای تحلیل سازه ها، ارائه مدلی از پل های ساخته شده از مصالح بنایی که بتواند رفتار آنها را به نحو مناسبی شرح دهد، در اقدامات بعدی جهت مقاوم سازی و مرمت پل ها بسیار مفید می باشد. در این پایان نامه با استفاده از مدل سازی پل قوسی سنگی به روش اجزا محدود، در محیط نرم افزار SAP2000 به بررسی میزان اثر بخشی روش های مقاوم سازی پل، نظیر استفاده از تسمه ها و ورق فولادی در قسمت قوس پل در دو حالت تحت بارهای ثقیلی و بار زلزله پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که استفاده از ورق فولادی که به جداره قوس به صورت کامل مقید

شده است، می تواند به شدت تنش ها و تغییرمکان های ایجاد شده در پل را تحت بارهای ثقلی و زلزله کاهش دهد. بر مبنای محاسبات انجام شده این روش هرچند از مصالح مصرفی، اندکی گران تر از روش استفاده از ورق های FRP است، ولی علاوه بر میزان اثر بخشی بیشتر دارای عملیات اجرایی به مراتب کمتری در مقایسه با آن روش می باشد.

کلمات کلیدی: پل های قوسی سنگی، مدل سازی به روش اجزا محدود، نرم افزار SAP2000، مقاوم سازی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- تاریخچه مهندسی پل.....	۱
۲-۱- تاریخچه پل های طاقی سنگی.....	۵
۳-۱- هدف.....	۵
۴-۱- معرفی.....	۶
۵-۱- ضرورت انجام این تحقیق.....	۶
۶-۱- روش انجام این تحقیق.....	۹
۷-۱- ساختار این پایان نامه.....	۱۰
فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی موضوع و پیشینه تحقیق.....	۱۱
۱-۲- مقدمه.....	۱۱
۲-۲- طبقه بندی پل ها.....	۱۵
۱-۲-۲- طبقه بندی پل از نقطه نظر طول دهانه.....	۱۵
۲-۲-۲- طبقه بندی پل از منظر سیستم سازه ای.....	۱۵
۳-۲-۲- طبقه بندی پل ها از نقطه نظر مصالح.....	۱۶
۴-۲-۲- طبقه بندی پل از نظر شیوه ساخت.....	۱۷
۵-۲-۲- طبقه بندی پل از نقطه نظر استفاده.....	۱۷

- ۳-۲- پل های قوسی (طاقی) ۱۷
- ۳-۲-۱- انواع پل های طاقی ۱۸
- ۳-۲-۱-۱- از منظر مصالح استفاده شده در ساخت پل ۱۸
- ۳-۲-۱-۲- از نظر سازه ای ۱۸
- ۳-۲-۱-۳- طبقه بندی پل های قوسی از منظر هندسی ۱۹
- ۳-۲-۲- دهانه پل های قوسی ۱۹
- ۴-۲- بارهای وارد بر پل ۲۰
- ۵-۲- مزایا و معایب پل های قوسی ۲۰
- ۶-۲- شناخت سازه ای قوس ۲۱
- ۷-۲- انواع مختلف هندسه قوس ۲۶
- ۸-۲- پل های قوسی مصالح بنایی ۲۷
- ۸-۲-۱- مقدمه ۲۷
- ۸-۲-۲- ظرفیت باربری قوس های مصالح بنایی ۲۸
- ۹-۲- انواع بارهای وارده به پل ۳۱
- ۹-۲-۱- بار ترافیکی جاده ۳۱
- ۹-۲-۲- بارگذاری پل براساس آیین نامه ایران (نشریه ۱۳۹) ۳۲
- ۹-۲-۲-۱- بارهای دایمی ۳۲
- ۹-۲-۲-۲- بارهای بهره برداری ۳۳
- ۹-۲-۲-۳- اثر باد بر روی پل ۳۵
- ۹-۲-۲-۴- اثرات تغییرات دما ۳۵
- ۹-۲-۲-۵- اثر نشست یا کوتاه شدن پایه های پل ۳۶

- ۲-۹-۲-۶- بار برف..... ۳۶
- ۲-۹-۲-۷- اثر زلزله..... ۳۶
- ۲-۱۰-۱- مروری بر تحقیقات گذشته..... ۳۶
- ۲-۱۰-۱- مطالعات بررسی و تشخیص..... ۳۷
- ۲-۱۰-۱-۱- مطالعه انجام شده توسط Ural و همکاران..... ۳۷
- ۲-۱۰-۲- مطالعات عددی..... ۴۳
- ۲-۱۰-۲-۱- تحقیق انجام شده توسط Arteaga – Morer..... ۴۳
- ۲-۱۰-۳- مطالعات نرم افزاری (اجزاء محدود)..... ۴۷
- ۲-۱۰-۳-۱- مطالعات Drosopolous و همکاران..... ۴۷
- ۲-۱۰-۳-۲- تحقیقات Zampieri و همکاران..... ۴۸
- ۲-۱۰-۳-۳- مطالعه انجام شده توسط کیوان نیا-خویشی..... ۴۹
- ۲-۱۰-۴-۳- مطالعه افراز حبیبی - احمدی..... ۵۰
- ۲-۱۰-۵-۳- پایان نامه مهندس تقی زاده..... ۵۰
- ۲-۱۰-۴-۴- مطالعات آزمایشگاهی..... ۵۱
- ۲-۱۰-۴-۱- مطالعات Modena و همکاران..... ۵۱
- ۲-۱۰-۵-۵- مطالعات اجزاء محدود و آزمایشگاهی..... ۵۴
- ۲-۱۰-۵-۱- مطالعه معرفت و همکاران بر روی یک پل قوسی بتنی غیر مسلح..... ۵۴
- ۲-۱۰-۵-۲- مطالعه Fanning – Boothby..... ۵۸
- فصل سوم: روش های تحلیل و بررسی پل ها..... ۶۲
- ۳-۱- مقدمه..... ۶۲
- ۳-۲- ضرورت بررسی رفتار پل ها..... ۶۲
- ۳-۳- معرفی انواع روش های تجزیه و تحلیل پل ها..... ۶۳

۶۳.....	۱-۳-۳- روابط تجربی.....
۶۳.....	۱-۳-۳- روابط تاریخی.....
۶۵.....	۲-۱-۳-۳- روابط ارائه شده برای شکل قوس ها.....
۶۶.....	۳-۱-۳-۳- ضخامت قوس در تاج قوس.....
۶۷.....	۴-۱-۳-۳- روابط تجربی ارائه شده برای ضخامت فونداسیون.....
۶۸.....	۵-۱-۳-۳- ماکزیمم طول قوس.....
۶۸.....	۶-۱-۳-۳- ضریب ریسک قوس.....
۶۹.....	۲-۳-۳- روابط و قوانین مدرن.....
۶۹.....	۱-۲-۳-۳- روش MEXE.....
۷۰.....	۲-۲-۳-۳- روش FILEV.....
۷۱.....	۳-۲-۳-۳- روش ارائه شده توسط Harvey و همکاران.....
۷۱.....	۴-۲-۳-۳- روش ارائه شده توسط Purtak و همکاران.....
۷۱.....	۳-۳-۳- مدل های تیری.....
۷۱.....	۱-۳-۳-۳- مدل های تیر ساده.....
۷۲.....	۲-۳-۳-۳- مدل تیر مرکب.....
۷۳.....	۴-۳-۳- روش اجزا محدود (FEM).....
۷۵.....	۵-۳-۳- روش اجزای گسسته (DEM).....
۷۵.....	۴-۳- مقایسه بین نتایج مطالعات تجربی و مدل سازی.....
۷۵.....	۱-۴-۳- آزمایش های بار گذاری روی قوس.....
۷۶.....	فصل چهارم: خسارات وارده به پل ها و روش های مقاوم سازی.....
۷۶.....	۱-۴- مقدمه.....
۷۶.....	۲-۴- روش های بررسی و آزمایش بر روی پل ها.....

۳-۴-۳-آزمون های غیرمخرب	۷۷
۳-۴-۱- چکش برجهنده.....	۷۷
۳-۴-۲-آزمون بار	۷۷
۳-۴-۳- نمونه برداری و مغزه گیری.....	۷۷
۳-۴-۴-آزمون جک تخت	۷۸
۳-۴-۵-آزمون توسط پالس های ماورای صوت.....	۷۸
۴-۴-تعمیر و روش های مقاوم سازی پل های قوسی سنگی.....	۷۸
۴-۴-۱- مقدمه	۷۸
۴-۴-۲- سازگاری و دوام عملیات اجرایی.....	۷۸
۴-۴-۳- انتخاب روش استفاده شده برای عملیات بهسازی.....	۷۹
۴-۴-۴- معرفی روش های مختلف تعمیر و مقاوم سازی.....	۷۹
۴-۴-۴-۱- تزریق.....	۷۹
۴-۴-۴-۲- جایگزین کردن بلوک ها.....	۷۹
۴-۴-۴-۳- روش Saddling	۸۰
۴-۴-۴-۴- استفاده از قوس بتنی در زیر قوس.....	۸۰
۴-۴-۴-۵- استفاده از میله ها و تسمه های پیش ساخته.....	۸۱
۴-۴-۴-۶- روش های تقویت نزدیک به سطح	۸۲
۴-۴-۴-۷- استفاده از ورق های FRP	۸۳
۴-۴-۴-۸- روش دوختن	۸۳
فصل پنجم: مطالعه موردی یک پل قوسی سنگی.....	۸۴
۵-۱- مقدمه.....	۸۴
۵-۲- معرفی پل استفاده شده در مطالعه موردی.....	۸۴

۸۵.....	۵-۲-۱- معرفی مشکلات پل.....
۸۶.....	۵-۲-۱-۱- مرمت اولیه.....
۸۶.....	۵-۲-۱-۲- بهسازی لرزه ای پل.....
۸۷.....	۵-۳-۱- صحت سنجی عملیات مدل سازی.....
۸۷.....	۵-۳-۱- روند مدل سازی پل در نرم افزار SAP2000.....
۹۲.....	۵-۴-۱- مقاوم سازی پل.....
۹۵.....	۵-۴-۱- نتایج تحلیل مدل های مقاوم سازی شده.....
۹۸.....	۵-۴-۲- انتخاب روش های مقاوم سازی لرزه ای.....
۹۹.....	۵-۵-۱- تحلیل لرزه ای پل ها.....
۹۹.....	۵-۵-۱- مقدمه.....
۱۰۰.....	۵-۵-۲- تحلیل طیفی و الزامات آن در برنامه SAP2000.....
۱۰۸.....	۵-۶-۱- تحلیل پل بوسیله بار قطار.....
۱۰۸.....	۵-۶-۱- بارگذاری قطار.....
۱۰۹.....	۵-۶-۲- ضریب دینامیکی.....
۱۱۲.....	۵-۶-۳- مدل بارگذاری انتخابی.....
۱۱۳.....	۵-۶-۴- نحوه اعمال بار.....
۱۱۶.....	۵-۷-۱- معیار سنجش نیروهای وارده به پل.....
۱۱۵.....	فصل ششم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات برای تحقیقات آتی.....
۱۱۷.....	۶-۱- مقدمه.....
۱۱۷.....	۶-۲- نتیجه گیری.....
۱۲۲.....	۶-۲-۱- سایر نتایج.....
۱۲۳.....	۶-۳-۱- ارائه پیشنهادات برای تحقیقات آتی.....

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱- نمونه ای از پل های اولیه مربوط به ۳۸۰۰ سال قبل از میلاد مسیح..... ۱
- شکل ۲-۱- بنای برجمانده از پل والرین (بند قیصر) در شهر شوشتر..... ۲
- شکل ۳-۱- پل بزرگ خداآفرین بر روی رودخانه ارس مرز میان ایران و جمهوری آذربایجان..... ۳
- شکل ۴-۱- پل قافلانکوه (پل دختر) بر سر راه میانه به زنجان و در شرق کوه قافلانکوه..... ۳
- شکل ۵-۱- پل الهوردی خان (سی و سه پل) اصفهان..... ۴
- شکل ۶-۱- پل خواجه واقع بر رودخانه زاینده رود اصفهان از آثار دوره صفوی..... ۴
- شکل ۷-۱- پل تله زنگ پس از بازسازی و مرمت (سال ۱۳۷۹)..... ۵
- شکل ۸-۱- ابعاد پل مورد مطالعه..... ۶
- شکل ۱-۲- پل Ponte Vecchio واقع در شهر فلورانس ایتالیا ساخته شده در ۹۹۶ پس از میلاد..... ۱۱
- شکل ۲-۲- پل استرلینگ واقع در اسکاتلند..... ۱۲
- شکل ۳-۲- نمایی از پل موسوم به پل شکسته قبل از انجام عملیات مرمت..... ۱۳
- شکل ۴-۲- پل شکسته پس از بازسازی (روند بازسازی به گونه ای انجام شده که شکسته بودن پل معلوم باشد)..... ۱۳
- شکل ۵-۲- دو نمای از پل قوسی سنگی در کشور سوئد و سازگاری آن با طبیعت اطراف..... ۱۴
- شکل ۶-۲- تقسیم بندی سازه ای پل..... ۱۵
- شکل ۷-۲- پل عابریپاده ساخته شده از پوسته بتنی در شهر مادرید اسپانیا..... ۱۶
- شکل ۸-۲- پل راه آهن ورسک به طول دهانه ۶۶ متر ساخته شده از مصالح بنایی سنتی چون سیمان و آجر..... ۱۷
- شکل ۹-۲- پل قوسی فلزی قطور خوی در آذربایجان غربی به طول ۴۴۸ متر قرار گرفته بر روی پایه های بتنی..... ۱۸

- شکل ۱۰-۲- پل قوسی فلزی با عرشه معلق واقع در شهر آمل..... ۱۹
- شکل ۱۱-۲- نخوه تحمل و انتقال بار در یک قوس..... ۲۲
- شکل ۱۲-۲- قسمت های مختلف پل قوسی..... ۲۲
- شکل ۱۳-۲- ایجاد بازشوها و سوراخ هایی در بخش خاکریزی پل های قوسی برای کاهش حجم مصالح استفاده شده... ۲۳
- شکل ۱۴-۲- مشخص کردن سنگ سرتاق در یک پل قوسی سنگی..... ۲۴
- شکل ۱۵-۲- حالت های مختلف اسپندردل در یک پل قوسی، (الف) اسپندردل بسته (ب) اسپندردل باز..... ۲۴
- شکل ۱۶-۲- بلوک نشیمن در یک پل قوسی..... ۲۵
- شکل ۱۷-۲- انواع حالت های اتصال قوس به پایه پل با استفاده از سنگ پاتاق..... ۲۵
- شکل ۱۸-۲- شکل هندسی بهینه قوس تحت حالت های مختلف بارگذاری وارد بر آن..... ۲۶
- شکل ۱۹-۲- روش پیشنهادی رابرت هوک برای بررسی تعادل قوی ها موسوم به روش رنجیر معکوس..... ۲۸
- شکل ۲۰-۲- تقسیم قوس به بلوک های مجزا برای ترسیم خط فشار..... ۲۹
- شکل ۲۱-۲- چگونگی توزیع تنش براساس قانون یک سوم میانی در مقطع یک بلوک از قوس..... ۳۰
- شکل ۲۲-۲- فروپاشی قوس با ایجاد ۴ یا ۵ مفصل در طول قوس..... ۳۰
- شکل ۲۳-۲- قوس نیم دایره تحت وزن خود -خطوط فشار حداقل (a) و حداکثر (b)، "هیمن" ۱۹۹۵..... ۳۱
- شکل ۲۴-۲- تغییرات میزان استفاده از اتومبیل در آلمان..... ۳۲
- شکل ۲۵-۲- نحوه مدل کردن بار ناشی از یک کامیون بر روی عرشه پل براساس نشریه ۱۳۹..... ۳۳
- شکل ۲۶-۲- مدل بارطراحی ارائه شده در آیین نامه AASHTO-2014 برای یک کامیون سه محوره بر روی عرشه پل..... ۳۴
- شکل ۲۷-۲- خرابی مشاهده شده در پل "متراسی" ناشی از نشست تکیه گاهی..... ۳۷
- شکل ۲۸-۲- شکل شماتیک استفاده از شمع های چوبی در قدیم برای تقویت پایه های پل..... ۳۸
- شکل ۲۹-۲- شکست ایجاد شده در پل "اورانکیت" در اثر سیل..... ۳۹
- شکل ۳۰-۲- تخریب صورت گرفته در پایه ها که با جداسدن بخشی از قسمت های پایه همراه بوده در اثر وقوع سیل..... ۳۹
- شکل ۳۱-۲- خسارت وارد آمده به پل میسیز در ترکیه در طول زلزله ۱۹۹۸ آدانا..... ۴۰

- شکل ۲-۳۲- از بین رفتن پوشش روی پل در اثر آب باران و نداشتن زهکشی مناسب در پل سویزلی- ترکیه.....۴۱
- شکل ۲-۳۳- تخریب صورت گرفته در پل به دلیل ضعف در مشخصات مکانیکی مصالح استفاده شده در ساخت پل.....۴۲
- شکل ۲-۳۴- بار ترافیکی سنگین عبوری از پل بیش از مقدار باری که پل برای آن طراحی شده است.....۴۲
- شکل ۲-۳۵- تمیز کردن پل از پوشش گیاهی ایجاد شده در سطح آن- پل اورانکیت ترکیه.....۴۳
- شکل ۲-۳۶- تصویر شش پل قوسی سنگی با هندسه مختلف استفاده شده جهت تخمین ظرفیت باربری پل.....۴۴
- شکل ۲-۳۷- رابطه نظیر بار فروپاشی قوس- دهانه قوس.....۴۶
- شکل ۲-۳۸- رابطه نظیر بار فروپاشی قوس- نسبت ضخامت به طول دهانه قوس.....۴۶
- شکل ۲-۳۹- مشخصات هندسی قوس و مکانیزم شکست ایجاد شده در قوس در حالت بدون مقاوم سازی.....۴۷
- شکل ۲-۴۰- حالت شکست در قوس تقویت شده با ورق FRP قرار گرفته بر روی کل سطح قوس خارجی.....۴۸
- شکل ۲-۴۱- وضعیت کرنش در سطح پل قوسی سه دهانه به طول دهانه ۱۸ متر و نسبت $f/L=0.5$ و $H/B=2$۴۸
- شکل ۲-۴۲- وضعیت کرنش در سطح پل قوسی پنج دهانه به طول دهانه ۶ متر و نسبت $f/L=0.2$ و $H/B=2$۴۹
- شکل ۲-۴۳- نقشه نمای روبروی پل قوسی سنگی درودگران.....۴۹
- شکل ۲-۴۴- نمایی از مدل ساخته شده از پل درودگران در نرم افزار ABAQUS و مش بندی مدل.....۵۰
- شکل ۲-۴۵- نمایی از پل سندرو گالو در شهر ونیز ایتالیا.....۵۲
- شکل ۲-۴۶- پل قوسی سنگی پس از خارج کردن خاکریز روی پل.....۵۲
- شکل ۲-۴۷- تقویت پایه های پل با استفاده از احداث فونداسیون های جدید.....۵۳
- شکل ۲-۴۸- مقطع عرضی از پل سندروگالو و عملیات مقاوم سازی انجام شده بر روی آن.....۵۳
- شکل ۲-۴۹- نمای پل قوسی کیلومتر ۲۳ راه آهن تهران- قم.....۵۴
- شکل ۲-۵۰- نحوه انجام بارگذاری بر روی یکی از دهانه های پل کیلومتر ۲۳.....۵۵
- شکل ۲-۵۱- تغییر مکان عمودی کلید قوس در طول بارگذاری.....۵۶
- شکل ۲-۵۲- مدل اجزا محدود و شرایط مرزی اعمال شده در محیط نرم افزار ANSYS.....۵۶

- شکل ۲-۵۳- تغییر شکل سازه و توزیع تنش در قوس در حد تسلیم..... ۵۷
- شکل ۲-۵۴- منحنی نیرو-تغییر مکان قائم پل تا بار نهایی..... ۵۷
- شکل ۲-۵۵- پل قوسی سنگی گریفیت واقع در دوبلین، ایرلند..... ۵۸
- شکل ۲-۵۶- مدل اجزا محدود از نصف پل گریفیت در محیط نرم افزار ANSYS شامل قوس سنگی و دیواره خاکی..... ۵۹
- شکل ۲-۵۷- مقایسه سطح تسلیم در دو مدل موهر-کولمب و دراگر-پراگر..... ۶۰
- شکل ۲-۵۸- نصب نمونه ای از وسایل اندازه گیری در سطح پل قوسی گریفیت..... ۶۰
- شکل ۳-۱- روابط تجربی برای طراحی پل قوسی ارائه شده توسط آلبرتی در حدود سال ۱۴۵۰ میلادی..... ۶۴
- شکل ۳-۲- تغییرات نسبت خیز قوس به طول دهانه قوس بر حسب طول دهانه قوس براساس فراوانی پل ها..... ۶۶
- شکل ۳-۳- رابطه بین ضخامت تاج قوس و طول دهانه براساس تحقیقات Purtak..... ۶۷
- شکل ۳-۴- طرح کلی روش هاروی و همکاران..... ۷۱
- شکل ۳-۵- سطح شکست مصالح سنگی براساس نتایج آزمایش Page - ۱۹۸۳ میلادی..... ۷۳
- شکل ۳-۶- سطوح شکست مصالح سنگی بر مبنای تحقیقات Seim (۱۹۹۸) و Lourenco (۱۹۹۶)..... ۷۴
- شکل ۳-۷- رابطه تنش-کرنش برای مصالح سنگی در فشار، برش و کشش بر مبنای تحقیقات Schlegel (۲۰۰۴)..... ۷۴
- شکل ۴-۱- نمونه ای از سوراخ ایجاد شده در قسمتی از پل سنگی..... ۷۷
- شکل ۴-۲- بتن کمر بند با ضخامت یکنواخت استفاده شده بین قوس و خاکریز روی آن..... ۸۰
- شکل ۴-۳- قوس بتنی کل وجه بیرونی قوس و پایه های آن را پوشانده است..... ۸۰
- شکل ۴-۴- قوس بتنی فقط قسمت نمای تحتانی قوس سنگی را پوشانده است..... ۸۱
- شکل ۴-۵- استفاده از میله یا ورق فلزی در زیر تاق قوس..... ۸۱
- شکل ۴-۶- قرار دادن میلگرد و تسمه های فولادی در داخل شیارهای ایجاد شده در سطح و سپس پر کردن شیارها با گروت..... ۸۲
- شکل ۴-۷- استفاده از میلگردهای طولی جهت تقویت پل قوسی..... ۸۲
- شکل ۴-۸- استفاده از روش دوختن به وسیله تسمه فولادی برای یکپارچه کردن قوس..... ۸۳
- شکل ۵-۱- نمایی از پل Rio Moline واقع در کشور ایتالیا..... ۸۵

- شکل ۵-۲- مقطع طولی پل Rio Moline ۸۵
- شکل ۵-۳- مشخصات مصالح تعریف شده در برنامه SAP2000 ۸۸
- شکل ۵-۴- نمایی از مدل ساخته شده از پل Rio Moline در برنامه SAP2000 با استفاده از المان های Solid ۸۹
- شکل ۵-۵- نحوه اعمال بار زنده گسترده معادل ۵ کیلونیوتن بر مترمربع بر سطح کل قوس ۸۹
- شکل ۵-۶- چگونگی توزیع تنش ایجاد شده در پل به صورت کننتوری برحسب مگاپاسکال ۹۰
- شکل ۵-۷- مقدار و محل ماکزیمم تنش ایجاد شده در قوس سمت راست پل (مقدار تنش برحسب مگاپاسکال) ۹۰
- شکل ۵-۸- مقدار و محل ماکزیمم تنش ایجاد شده در قوس سمت چپ پل (مقدار تنش برحسب مگاپاسکال) ۹۱
- شکل ۵-۹- نحوه توزیع تنش در مدل ساخته شده توسط Tecchio و همکاران ۹۱
- شکل ۵-۱۰- تقویت قوس پل با استفاده از سه ردیف تسمه فولادی به مساحت 2cm^2 متصل شده به قسمت زیر قوس ۹۳
- شکل ۵-۱۱- محل قرار گیری تسمه های فولادی در سه مقطع اول، وسط و انتهای عرض پل به طول ۴ متر می باشد. ۹۳
- شکل ۵-۱۲- استفاده از ورق های فولادی به ضخامت ۲ سانتیمتر در کل سطح قوس ۹۴
- شکل ۵-۱۳- محل قرارگیری ستون در قوس های سمت چپ و راست ۹۴
- شکل ۵-۱۴- توزیع تنش برحسب مگاپاسکال در سطح مدل پل مقاوم سازی شده توسط تسمه های فولادی ۹۵
- شکل ۵-۱۵- توزیع تنش برحسب مگاپاسکال در سطح مدل پل مقاوم سازی شده توسط ورق فولادی ۹۶
- شکل ۵-۱۶- نحوه توزیع تنش در پل مدلسازی شده بوسیله پل مقاوم سازی شده با ستون و ورق فولادی ۹۶
- شکل ۵-۱۷- توزیع تنش در مدل پل مقاوم سازی شده با ورق های FRP ۹۷
- شکل ۵-۱۸- طیف استاندارد نظیر شتابنگاشت ثبت شده از زلزله کوبه بدست آمده از نرم افزار Seismosignal ۱۰۰
- شکل ۵-۱۹- تعریف طیف استاندارد نظیر زلزله کوبه در برنامه SAP2000 ۱۰۱
- شکل ۵-۲۰- تعریف بارطیفی نظیر زلزله کوبه ژاپن در برنامه SAP2000 ۱۰۲
- شکل ۵-۲۱- چگونگی توزیع تنش ایجاد شده در سطح پل بدون مقاوم سازی برحسب مگاپاسکال ۱۰۳
- شکل ۵-۲۲- توزیع تنش در مدل مقاوم سازی شده با سه ردیف تسمه فولادی (10^{-3} MPa) ۱۰۳
- شکل ۵-۲۳- توزیع تنش در مدل مقاوم سازی شده با ورق و ستون فولادی ۱۰۴

- شکل ۵-۲۴- توزیع تنش در مدل مقاوم سازی شده با ورق فولادی ($\times 10^{-3}$ MPa)..... ۱۰۴
- شکل ۵-۲۵- توزیع تنش در سازه بدون مقاوم سازی..... ۱۰۵
- شکل ۵-۲۶- تنش در قوس با سه تسمه فولادی..... ۱۰۶
- شکل ۵-۲۷- توزیع تنش در سازه مقاوم سازی شده با ورق فولادی..... ۱۰۶
- شکل ۵-۲۸- مدل مقاوم سازی شده با ورق فولادی و ستون های فلزی..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۹- بار زنده نوع RU..... ۱۰۸
- شکل ۵-۳۰- بار زنده نوع SW/0..... ۱۰۹
- شکل ۵-۳۱- بار زنده نوع RL..... ۱۰۹
- شکل ۵-۳۲- واگن ها و لکوموتیوهای تحت پوشش بارگذاری RU..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳۳- واگن ها و لکوموتیوهای تحت پوشش بارگذاری RL..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۴- بار قطار استاندارد بصورت گسترده..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳۵- سازه مدل شده با ورق فولادی به ضخامت ۲ سانتیمتر..... ۱۱۳
- شکل ۵-۳۶- توزیع تنش در سازه مقاوم سازی شده با ستون و ورق فولادی..... ۱۱۴
- شکل ۵-۳۷- سازه مدل شده با ورق فولادی به ضخامت ۲ سانتیمتر..... ۱۱۵
- شکل ۵-۳۸- توزیع تنش در سازه مقاوم سازی شده با ستون و ورق فولادی..... ۱۱۵
- شکل ۶-۱- مقایسه مقادیر ماکزیمم تنش ایجادشده در قوس پل مورد مطالعه بین حالت های مختلف مورد بررسی..... ۱۱۸
- شکل ۶-۲- مقایسه مقادیر ماکزیمم تنش ایجادشده در پل مورد مطالعه بین حالت های مختلف تحت بار ثقیلی و زلزله..... ۱۱۸
- شکل ۶-۳- نواحی ایجاد تنش های کششی بحرانی در پل مقاوم سازی نشده تحت اثر بار ثقیلی و زلزله..... ۱۱۹
- شکل ۶-۴- نواحی ایجاد تنش های کششی بحرانی در پل مقاوم سازی شده با ورق فولادی تحت اثر بار ثقیلی و زلزله..... ۱۲۰
- شکل ۶-۵- تغییر شکل سازه تحت اثر بارهای مرده و زنده به تفکیک در قوس سمت چپ و راست..... ۱۲۰
- شکل ۶-۶- تغییر شکل سازه تحت اثر بارهای مرده، زنده و زلزله به تفکیک در قوس سمت چپ و راست..... ۱۲۱

فهرست جدول ها

جدول ۱-۱- آمار پل های شبکه راه آهن به تفکیک نوع و مجموع طول.....	۷
جدول ۱-۲- مشخصات هندسی قوس های مدل شده.....	۴۵
جدول ۲-۲- مشخصات مصالح سنگی و FRP استفاده شده در پل مطالعه شده.....	۴۷
جدول ۳-۲- نتایج انواع بارگذاری اعمالی در پل مورد مطالعه مهندس تقی زاده.....	۴۷
جدول ۴-۲- مشخصات هندسی پل.....	۵۴
جدول ۵-۲- مشخصات بتن بدست آمده از آزمایش انجام شده بر روی پل.....	۵۵
جدول ۶-۲- مقایسه نتایج تحلیل اجزا محدود و مطالعات تجربی بر روی پل گریفیت.....	۶۱
جدول ۱-۳- معرفی انواع روش های ارائه شده برای تحلیل پل های قوسی.....	۶۳
جدول ۲-۳- انواع شکست در قوس های دایره ای.....	۶۵
جدول ۳-۳- ماکزیمم طول تئوریک دهانه پل های قوسی برای قوس های ساخته شده از مواد مختلف.....	۶۸
جدول ۴-۳- مقادیر ضریب ریسک اسپنکنبرگ برای قوس های مختلف.....	۶۹
جدول ۵-۳- تکامل مدل های تیری برای پل های قوسی.....	۷۲
جدول ۱-۵- ماکزیمم تنش و تغییر مکان در پل.....	۹۸
جدول ۲-۵- ماکزیمم تنش و تغییر مکان در مرکز دهانه پل.....	۹۹
جدول ۳-۵- میزان تغییر مکان بر حسب میلیمتر در قوس سمت چپ.....	۱۰۵
جدول ۴-۵- میزان تغییر مکان بر حسب میلیمتر در قوس سمت راست.....	۱۰۷

- جدول ۵-۵- میزان تغییر مکان بر حسب میلیمتر در قوس سمت چپ..... ۱۰۸
- جدول ۵-۶- فاکتور دینامیکی برای بارگذاری RU..... ۱۰۹
- جدول ۵-۷- خلاصه انواع مدل های بارگذاری..... ۱۱۲
- جدول ۵-۸- میزان تنش مجاز در سازه های بنایی..... ۱۱۶
- جدول ۶-۱- هزینه بابت استفاده از تسلیحات ارائه شده..... ۱۲۱

پیش گفتار

این پایان نامه مشتمل بر ۶ فصل بوده که در فصل اول ضمن بیان تاریخچه ای از مهندسی پل با انواع پل ها، بارهای وارد بر پل، خسارت های وارده بر پل ها و انواع روش های تحلیل و بررسی رفتار پل ها ارائه می گردد.

در فصل دوم مروری بر ادبیات فنی مرتبط به پل های قوسی شده و همچنین پیشینه ای از تحقیقات انجام شده در گذشته ارائه می گردد.

در فصل سوم انواع روش های تحلیل و بررسی پل های قوسی و پل های ساخته شده از مصالح بنایی شرح داده شده است.

در فصل چهارم انواع روش های ارائه شده برای مقاوم سازی پل های که تاکنون توسط محققین مختلف ارائه شده بیان گردیده است.

در فصل پنجم ضمن معرفی مشخصات پل قوسی سنگی استفاده شده در این تحقیق، روند مدل سازی آن در نرم افزار SAP2000 بیان و همچنین دو مدل براساس تسلیم جزئی و کلی قوس برای مقاوم سازی آن ارائه شده است. در انتهای این فصل نتایج تحلیل مدل ها ارائه شده و با برآوردی از هزینه اجرا، مقایسه ای از کارایی این روش ها انجام می شود.

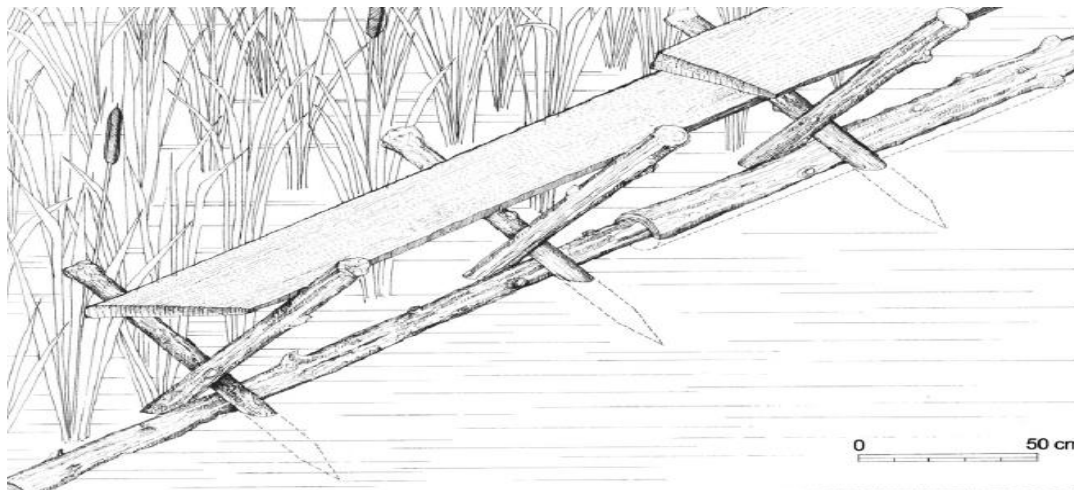
در فصل ششم ضمن ارائه نتایج کلی بدست آمده در این تحقیق، پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی بیان شده است.

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- تاریخچه مهندسی پل

نیاز بشر به راه های ارتباطی و وجود ناهمواری های طبیعی نظیر دره ها و کوه ها و رودخانه ها، سبب شد تا بشر به منظور ساده تر کردن و افزایش سرعت عبور برای گذر از این ناهمواری ها، معبری ایجاد نماید که امروزه به آن پل گفته می شود. پل های اولیه ساخته شده، تیرهای ساده از سنگ یا چوب بودند که بر روی پایه های سنگی در روی رودخانه ها انداخته می شدند (شکل ۱-۱). در رودها با دهانه های بزرگتر، این تیرها توسط الیاف به صورت معلق در می آمدند. با این وجود اولین بنای سازه ای پل را می بایستی در فرم پل های طاقی جستجو نمود که به حدود ۹۰۰ سال قبل از میلاد مسیح در ترکیه برمیگردد. در میان اروپایی ها، رومیان پیشتاز استفاده از طاق های سنگی به عنوان سازه باربر در ساختمانها و پل ها بودند. اولین پل طاقی (سنگی) شناخته شده رومی، پل سولارس^۱ بر روی رودخانه تورون^۲ است که به ۷۰۰ سال قبل از میلاد مسیح برمی گردد. [۱]



شکل ۱-۱- نمونه ای از پل های اولیه مربوط به ۳۸۰۰ سال قبل از میلاد مسیح [۲]

^۱ Solares

^۲ Teverone

در ایران هم براساس شواهد و بناهای برجامانده نیز می توان به این نتیجه رسید که فن و هنر پل سازی میان ایرانیان در طول تاریخ رواج داشته است. هرچند قسمت مرکزی فلات ایران کم آب و جلگه ای است ولی در مناطق شمالی و غربی کشور که نزدیک رشته کوه های البرز و زاگرس قرار دارند به دلیل وجود رودهایی که در فصل بهار آبشان دچار طغیان می شد، اگر پلهایی بر روی این رودها احداث نمی گردید امکان حرکت کاروانها میسر نبود. نکته قابل توجه در اینجا این است که هرچند در تاریخ ایران ما با اسامی پلهای مهمی مواجه می شویم ولی امروزه همه آنها پابرجا نبوده که این امر به این دلیل بوده که پلها در معرض شدید ترین فرسایش و تخریب های ناشی از جریان های طغیانی هستند. پل والرین (بند قیصر) در شهر شوشتر واقع در استان خوزستان نمونه ای از بنای ترکیبی از سد و پل به جامانده از دوره ساسانی است که ارتفاع آن به ۲ متر می رسد (شکل ۱-۲). در پلهای طاقی دوره ساسانی معمولاً قطعات سنگی با بستهای آهنی و سربی به یکدیگر پیوند می یافتند [۱]



شکل ۱-۲- بنای برجامانده از پل والرین (بند قیصر) در شهر شوشتر

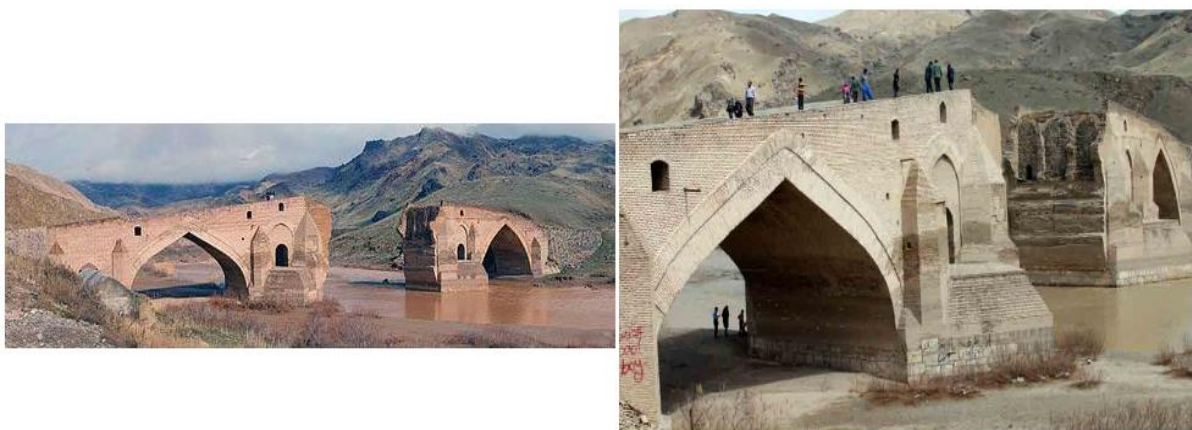
پس از ساسانیان و دوران اسلامی بسیاری از پل های ساخته شده در دوران قبل از اسلام تعمیر شده بطوریکه بسیاری از پلهایی که امروزه برجامانده بدین صورت بوده که دارای پایه های ساسانی است که بعدها در دوره اسلامی قسمت های بالای آنها تعمیر شده و به سبک اسلامی و با مصالح آجری بازسازی شده اند. از جمله مهمترین پلهای دوره اسلامی عبارتند از:

پل خداآفرین بر روی رودخانه ارس در شمال آذربایجان، نخستین پل بزرگ دوره اسلامی به شمار می رود که در سال ۶۳۸ میلادی ساخته شده است (شکل ۱-۳).

پل قافلانکوه، ساختمان اولیه آن در قرن پنجم هجری انجام شده است. تعمیر اول آن به دوره شاه عباس اول و تعمیر دوم آن به قرن یازدهم هجری برمی گردد (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۳- پل بزرگ خداآفرین بر روی رودخانه ارس مرز میان ایران و جمهوری آذربایجان



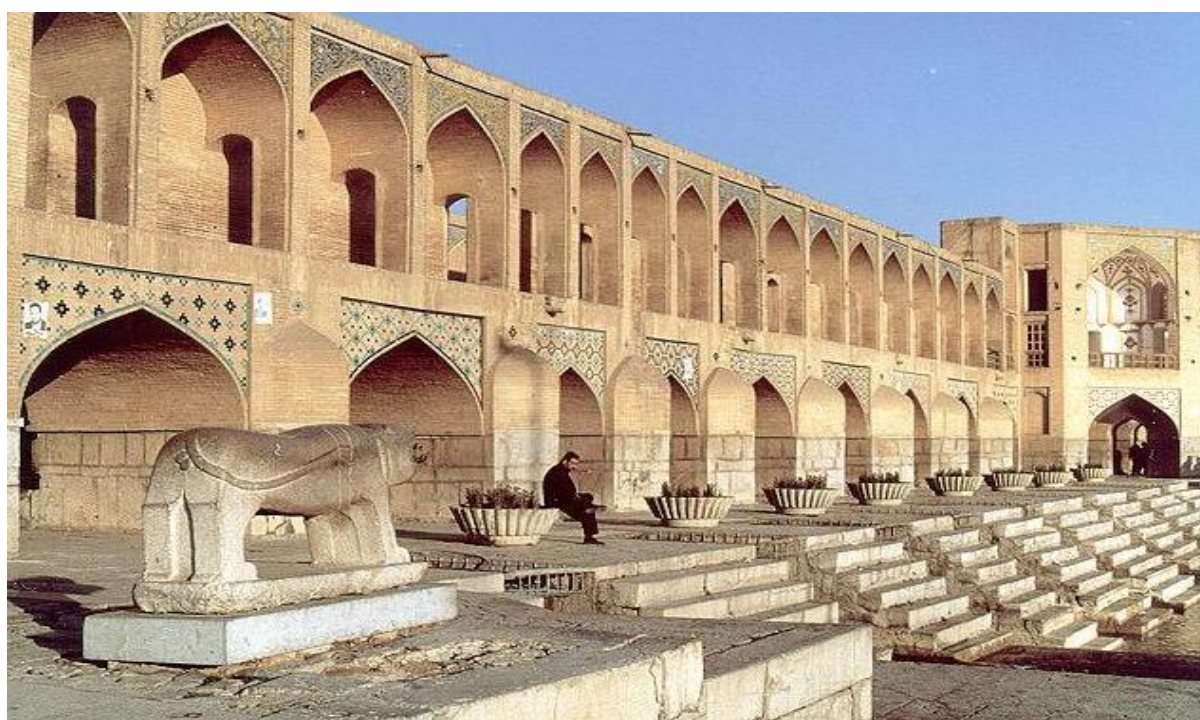
شکل ۱-۴- پل قافلانکوه (پل دختر) بر سر راه میانه به زنجان و در شرق کوه قافلانکوه

پس از اسلام در دوران صفوی ایران به شکوه و عظمت خود بازگشته و معماری ایران و ازجمله پل سازی نیز در این دوران از رشد و شکوفایی زیادی بهره مند می شود. از پلهای این دوره می توان به پل الهوردی خان (سی و سه پل) و پل خواجه که هر دو بر روی رودخانه زاینده رود در شهر اصفهان بنا شده اند نام برد. به عقیده برخی از محققان پل خواجه نقطه اوج صنعت پل سازی در ایران است. برخی از مشخصات این پل عبارت است از: [۱]

این پل با ۲۱ دهانه دارای طول کلی معادل ۱۳۱/۵۷ متر، ضخامت طاق پل ۱/۲۵ متر، ضخامت پایه های پل بین ۱/۶ تا ۱/۹۳ متر و طول دهانه پل (فاصله محور تا محور پایه ها) بین ۴/۲ تا ۵/۸ متر است.



شکل ۱-۵- پل اله وردی خان (سی و سه پل) اصفهان



شکل ۱-۶- پل خواجو واقع بر رودخانه زاینده رود اصفهان از آثار دوره صفوی

پل قوسی سنگی تله زنگ، در کیلومتر ۵۸۷ راه آهن لرستان، با یک دهانه اصلی ۶۰ متر و نه دهانه ۱۰ متری، در سالهای ۱۳۱۴ تا ۱۳۱۷ طراحی و اجرا شده است. در سال ۱۳۶۵، دهانه اصلی پل بر اثر بمباران هوایی تخریب شد. به منظور برقراری هر چه سریعتر ارتباط، عرشه جدید بصورت ۶ تیر ورق فلزی، به طول ۷۲ متر و به ارتفاع ۲/۵ متر، طراحی و در سال ۱۳۶۶ اجرا شد. پس از بهره برداری، مشخص گردید که عرشه دارای تغییر شکل ها و لرزش های بزرگ است، به نحوی که ادامه سرویس پل را نامطمئن میسازد. با توجه به مشکلات مذکور، تقویت پل در دو مرحله در سالهای ۱۳۷۰ و ۱۳۷۳ صورت گرفت. اگر چه این تقویت ها، برخی از مشکلات پل را حل نمود، لیکن ارتعاشات بزرگ جانبی کماکان باقی ماند و ادامه بهره برداری را با

مشکل مواجه ساخت. به منظور شناسایی مشکلات و یافتن راه حل های احتمالی، تصمیم گرفته شد تا آزمایش بارگذاری تمام مقیاس بر روی پل انجام شود. با انجام این آزمایش ها، پاسخ سازه به صورت تغییر شکل، شتاب و کرنش ثبت شد. بررسی ها نشان داد که تغییر شکل جانبی در حدود ۵ بر ابر مقادیر مجاز بوده و مقادیر شتاب عرشه نیز به اعداد بزرگی در حدود $1g$ بالغ می گردد. بر مبنای نتایج بدست آمده، مدل اجزای محدود پل بهنگام شد واز آن برای تحلیل در برابر بارهای استاندارد استفاده شد و نهایتاً راهکارهای تقویت مناسب با در نظر گرفتن نکات اجرایی بصورت مقدماتی ارائه گردید. [۴۹]



شکل ۱-۷- پل تله زنگ پس از بازسازی و مرمت (سال ۱۳۷۹) [۵۰]

۲-۱- تاریخچه پل های طاقی سنگی

ساخت پل های طاقی قوسی سنگی در جهان تا حدود قرن ۱۹ میلادی ادامه یافت ولی از این زمان به بعد با کشف مصالح نوین سازه ای نظیر چدن و فولاد، از این مصالح در ساخت طاق ها و خرپاهای تشکیل دهنده پلها استفاده شد. نکته دیگر در این زمان ساخت لوکوموتیو و در نتیجه استفاده از پلهای موجود در صنعت راه آهن است. از جمله مصالح دیگر که صنعت پل سازی را دگرگون نمودند، بتن و استفاده از بتن مسلح در ساخت پل ها و همچنین ساخت کابل هایی دارای مقاومت کششی بسیار بالا بود که تحولی در ساخت پلهای معلق و کابلی ایجاد نمود.

۳-۱- هدف

در این تحقیق که در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد صورت می پذیرد پس از بررسی پل های طاقی سنگی در راه آهن ایران و معرفی عیوب و تخریب های ایجاد شده در این پل ها، نسبت به بررسی کامل و معرفی روش های تعمیر، نگهداری و مقاوم

سازی پل های راه آهن اقدام می گردد و نهایتاً یک پل طاقی سنگی را تحت اثر بار زنده و بارهای لرزه ای قرار داده و به معرفی روش مقاوم سازی استفاده شده در راه آهن ایران و روش ارائه شده در این تحقیق پرداخته می شود.

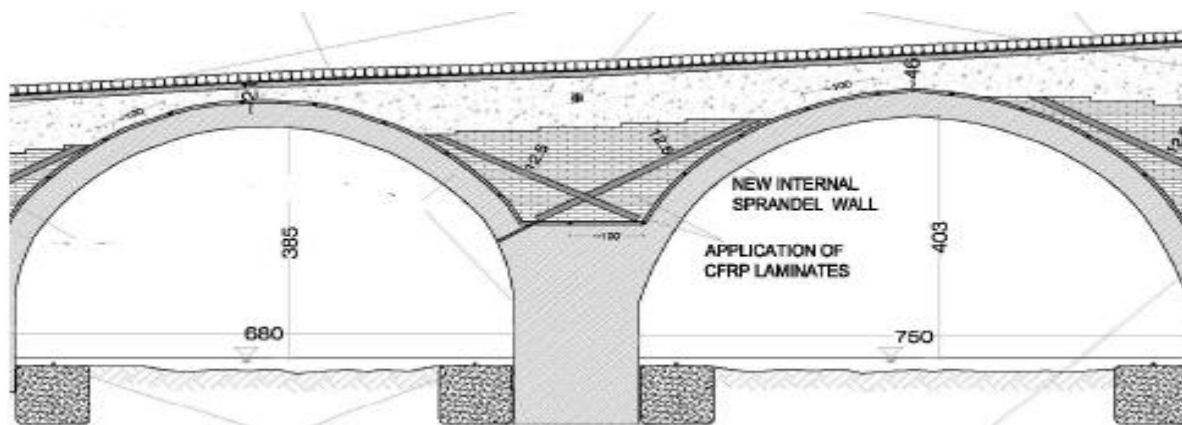
۴-۱- معرفی

پل های با مصالح بنایی از اجزای خط آهن می باشند که در برابر بارهای فشاری مقاومت مناسبی دارند اما در برابر سایر بارها خصوصاً بارهای کششی مقاومت خوبی ندارند.

عملیات تعمیر و بهسازی نیز باید بگونه ای باشد که بدون تخریب پل نیز قابل انجام باشد اما در صورت نیاز به تخریب پل روش مناسبی باشد از این رو محدودیت های اجرایی زیادی نیز وجود دارد.

در روش ارائه شده توسط این تحقیق و نیز روشی که توسط راه آهن ایران انجام شده است استفاده از روش هایی ارائه شده که بدون تخریب پل و فقط با تغییرات بسیار کمی در سازه پل به جهت افزایش باربری ارائه شده است.

پل انتخاب شده یک پل طاقی سنگی به نام Rio Moline می باشد اما از روش های بهسازی و مقاوم سازی قابل اجرا در خط آهن ایران استفاده شده است. هندسه این پل از دو دهانه با طول و ارتفاع متفاوت می باشد که شکلی شماتیک از آن با ارائه جزئیات و ابعاد مشخص می باشد لازم به ذکر است که ضخامت های قوس پل نیز متغیر بوده و از مقدار ۳۰ تا ۴۵ سانتی متر می باشد.



شکل ۱-۸- ابعاد پل مورد مطالعه

۵-۱- ضرورت انجام این تحقیق

هر چند پلها برای دوره عمر نسبتاً طولانی طراحی می شوند، اما از آنجاییکه تحت بارگذاری های مختلفی در طول عمر خود قرار می گیرند که ممکن است تعدادی از آنها در زمان طراحی پل یا لحاظ نشده باشند و یا با مقادیر کمتری از آنچه در عمل بر پل وارد شده است، در نظر گرفته شده باشند و همچنین قرار گرفتن پل در شرایط مختلف آب و هوایی و در نتیجه بالا رفتن اثرات محیطی بر روی اعضای سازه ای تشکیل دهنده آن نظیر وقوع فرسایش های مختلف و خوردگی، می تواند باعث وقوع آسیب در

بخشی از پل شده که این آسیب می تواند در مدت زمان کوتاهی گسترش یافته و به سایر قسمتهای پل نیز رسیده و نهایتاً منجر به تخریب کامل پل شود.

در جدولی که پیش رو قرار دارد تعداد زیاد پل های طاقی استفاده شده در راه آهن ایران را نشان می دهد که اهمیت نیاز به روش های بررسی و تعمیر این پل ها را به همراه روش هایی برای بهسازی را نشان می دهد.

جدول ۱-۱: آمار پل های شبکه راه آهن به تفکیک نوع و مجموع طول [۵۱]

اداره کل راه آهن	بوز (B)	داکو (O)	فريتون (F.B)	طاق سنگی (A.V)	فلزی (P.M)	طاقی (P.V)	طاقی خوابیده (A.V.S)	طاقی چند دهانه (P.V.S)	(P.en)	باکس (BOX)	مرکب (COM)	خربا فلزی (Trus)	سیفون (S-I)	گذرگاه غیر همسطح	جمع کل	طول کل
آذربایجان	۱۵۹۲	۹۶۸	۶۳۶	۳۹۸	۱۷	۲۶	-	-	-	-	-	-	-	۳۲	۳۶۶۱	۱۶۴۶۰
اراک	۲۱	۳۶۷	۴۱۲	۳۹۶	۶	۱	-	-	-	-	-	-	-	۲۰	۱۳۲۳	۷۹۹۲
اصفهان	۷۰۵	۵۴۴	۱۹۶۲	۲۳۱	۲	-	-	-	-	-	۲	۲	۴	۳۷	۳۲۱۹	۳۰۲۲۵
تهران	۱۴۶۱	۶۱۳	۳۹۰	۱۱۸	۱۰۱	۱	۳۰	۲۰	-	-	-	-	۳۴	۶۲	۳۸۳۰	۳۰۴۵
جنوب	۳۱۹	۱	۲۸	۵۸	۱۱۴	-	-	-	-	۳۹	۵۶	-	۶	۷	۵۲۸	۶۸۶۵
کرمان	۰	۰	۱۰۰۴	۱۲	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۱۰۲۳	۱۱۱۸۵
جنوب شرق	۱۲۲	۷۴	۷۲	۲	۱۸	۱	-	-	-	-	-	-	-	۰	۲۹۰	۳۱۱۰
خراسان	۷۳	۴۷۶	۵۴۷	۱۶۴	۱	۳	۳۱	-	-	-	-	-	۷	۳۱	۱۳۳۳	۹۰۲۵
یزد	۴۲۵	۴۱۲	۱۰۳۴	۱۰۳	۰	۳	-	۲	۴	-	-	-	۱	۲۰	۲۰۰۳	۲۱۸۹۸
شمال	۱۱۲	۳۴۲	۴۱۴	۶۴۲	۴۶	-	-	-	۲۶	۲	-	-	۵	۷	۱۵۹۶	۹۳۲۰
شمال شرق	۱۱۹۱	۴۳۵	۳۸۹	۳۵۱	۱۶	-	۳۶	۱	-	۴	-	-	۸	۱۱	۲۴۴۲	۲۰۶۳۸
شمال غرب	۵۵۱	۵۶۹	۳۱۷	۵۰۹	۱۰	۶	-	۰	-	۱	۱۱	۱	۲۷	۳۹	۲۰۴۱	۱۷۲۷۰
لورستان	۱۱	۱۰۸	۲۸۷	۴۵۴	۳	-	-	-	-	۴	-	-	-	۱	۸۶۸	۸۸۹۰
شرق	۰	۰	۳۳۵	۰	۸	-	-	-	-	۲	-	-	۲	۲	۳۴۹	۲۰۹۵
هرمزگان	۱	۱۸۲	۲۰۱۱	۹۷	۲	-	-	-	-	-	-	-	-	۱	۲۲۹۴	۹۴۶۳۲
جمع کل	۶۴۸۴	۵۰۹۱	۹۵۶۸	۳۵۲۶	۳۴۷	۴۱	۴۱	۲۳	۳۰	۵۲	۶۹	۳	۸۴	۲۷۴	۲۵۶۹۰	E+053

پدیده تخریب در پلهای تاریخی(قدیمی) که عمدتاً از مصالح سنتی در ساخت آنها بکاررفته ، شایع تر است چرا که درگذر زمان این پل ها دچار فرسودگی های محیطی و انسانی مختلفی شده اند که به دلیل عدم توجه به بحث تعمیر ، نگهداری و مراقبت از آنها و همچنین اعمال بارهای بیش از بار مجاز بر آنها، خسارات موضعی ایجاد شده در این پل ها در سطح کل پل گسترش یافته است. تخریب این پل ها علاوه بر اینکه سبب مختل شدن راههای ارتباطی و سایر کاربری های تعریف شده برای آنها می شود، ضایعات فرهنگی و تاریخی نیز به همراه دارد. بنابراین توجه به نحوه رفتار و عملکرد پل های موجود به ویژه پل های ساخته شده از مصالح سنتی و همچنین بررسی و تعیین خسارات ایجاد شده در آنها تحت بارگذاری های جدید وارده و ارائه راهکارهایی برای رفع این خسارات و مقاوم سازی پل امری لازم و ضروری است.

پلهای تاریخی و قدیمی تخریب شده که امروزه در کنار راه هایی در نقاط مختلف کشور دیده می شوند، بیانگر این حقیقت بوده که پل ها علاوه بر اینکه همچون سایر بناها در معرض خرابی قرار دارند، آسیب پذیری آنها به مراتب از سایر بناها بیشتر است. تجربیات و مطالعات اخیر نشان داده اند که در اثر سه عامل زیر که به عنوان مهم ترین موارد قابل ذکر هستند عملکرد پل ها در مدت زمان کوتاهی مختل می شود.

- ۱- شرایط نامناسب محیطی
- ۲- عبور بارهای پیش بینی نشده
- ۳- عدم تعمیر، بازرسی و نگهداری مناسب

در راه آهن ایران پلهای ساخته شده از مصالح بنایی و سنتی نظیر سنگ و آجر به وفور دیده می شود. از آنجاییکه خطوط ریلی در اقتصاد کشور نقش بسیار مهمی دارند، توجه به نحوه رفتار و بازسازی و مقاوم سازی پلهای موجود توجه اقتصادی زیادی دارد. افزایش مداوم بار ترافیکی پل های راه آهن از یک طرف و افزایش سن و سال پل ها از طرف دیگر لزوم توجه به آنها را محسوس تر میکند. این امر در کشورهایی که به ویژه در معرض خطر لرزه ای بالایی قرار دارند بسیار حادث است.

به منظور مقاوم سازی پل های موجود، تعیین وضعیت موجود و توانایی باربری فعلی پل و همچنین تعیین نقاط بحرانی پل تحت بارهای مختلف وارده بر پل امری ضروری است. از آنجاییکه پل ها سازه های بزرگی می باشند انجام مطالعات آزمایشگاهی در مورد آنها چندان ساده نمی باشد. با پیشرفت تکنولوژی و به عرصه آمدن رایانه ها از یکسو و همچنین ارائه روش های تحلیل پیشرفته با دقت بالا و در نتیجه نرم افزار های تجاری تحلیل سازه ها، ارائه مدلهایی از پل که بتواند رفتار آن را با دقت بالایی پیش بینی کند در امر مقاوم سازی پل بسیار حائز اهمیت است. از طرف دیگر بعد از تعیین مقاطع بحرانی پل، با توجه به اینکه تاکنون روش های مختلفی جهت بهسازی و مقاوم سازی پل ها از سوی محققان و شرکت های مختلف ارائه شده است، ارائه برآوردی از میزان کارایی هریک از این روش ها (چه از منظر سازه ای و چه از منظر اقتصادی)، می تواند برای اتخاذ روش تعمیر پل ها بسیار راهگشا باشد.

دلایل تکنیکی اصلی آسیب دیدگی و خرابی در پل ها عبارتند از:

- ۱- زلزله : در اثر زمین لرزه ترک هایی در وسط دهانه قوس اصلی ظاهر می شود و جداسازی رویه راه اتفاق می افتد.
- ۲- سیلاب : علاوه بر فشار هیدروستاتیکی ناشی از سیلاب، سیلاب سبب شده تا سنگ های بزرگ و تنه های درختان حرکت کرده و به پایه های پل برخورد کنند و در آنها ترک ایجاد کنند. در بعضی از موارد نیز سبب از بین رفتن ملات بین سنگهای تشکیل دهنده پل می شود.
- ۳- نشست تکیه گاهی که خود ناشی از سه عامل زیر است:
(الف) کاهش ظرفیت برشی خاک زیر پایه
(ب) برداشتن شن و ماسه اطراف پایه های پل برای تهیه بتن
(ج) سیلابهای شدید که بیشتر مواقع باعث خرابی پایه ها می شوند
- ۴- زهکشی نامناسب : در صورت نامناسب بودن زهکشی دانه های ریزتر از داخل خاکریز شسته شده و با افزایش تخلخل ظرفیت باربری پل کاهش می یابد و آبی که فضای بین دانه های جامد را پر می کند از مقاومت مصالح می کاهد. [۵]

تاکنون روش های مختلفی برای مطالعه و بررسی رفتار پل ها ارائه شده است که در فصول بعدی به تشریح آنها پرداخته می شود. یکی از شناخته شده ترین روش های ارزیابی پل های قوسی ساخته شده از مصالح بنایی روش نیمه تجربی MEXE می باشد [۷].

این روش به منظور تعیین توانایی قوس‌های بنایی برای عبور تانک‌های ارتش توسعه یافته است و شامل فاکتورهای کاهنده مختلفی است. در این روش ظرفیت باربری کل پل از تعمیم ظرفیت باربری پل درحالتیکه فقط یک دهانه دارد تعیین می‌شود. این روش از آنجاییکه نسبت به شکل هندسی پل، محل قرارگیری بار و اندرکنش قوس و پایه‌ها حساسیت زیادی ندارد و در عین حال هیچ گونه اطلاعاتی در مورد تغییر مکان بدست نمی‌دهد، با وجود سادگی توصیه نمی‌شود.

روش دیگر روش مکانیسم فروریزی بوده که روش کلاسیک ارزیابی قوس است [۶]. در این روش فرض شده است که مصالح بنایی بدون مقاومت کششی و دارای مقاومت فشاری نامحدود می‌باشند و لغزش در گسیختگی دخالته ندارد. این روش گسیختگی پل را ناشی از تغییرشکل غیرخطی (شکل‌گیری مفصل‌ها) در تعداد محدودی از بخش‌ها که به دلیل جداشدگی یا ترک می‌باشد بیان می‌کند [۸]. دقت این روش فقط در زمانی که محل قرارگیری بار و تعداد آن مشخص باشد قابل قبول است و این روش برای بارگذاری‌های عرضی پل قابل استفاده نمی‌باشد چراکه گسیختگی لغزشی و اصطکاکی در این روش مجاز نمی‌باشد.

روش المان مجزا روش دیگر بررسی رفتار پل‌ها بوده که در این روش قوس به یکسری از بلوک‌های صلب تقسیم شده که اندازه آنها از سنگ طاق‌ها در واقعیت کمی بیشتر است. خاکریز روی قوس به صورت یکپارچه مدل شده و خصوصیات ملات بین اتصالات به صورت صریح مدل نمی‌شود. در این روش از برنامه نویسی خطی برای حل مسئله استفاده می‌شود [۹].

یکی از جدیدترین روش‌هایی که امروزه در تحلیل بسیاری از سازه‌ها از جمله پل‌های قوسی استفاده می‌شود، روش اجزا محدود است که به دلیل قابلیت‌های آن اساس بسیاری از نرم افزارهای تجاری ارائه شده برای تحلیل و طراحی سازه‌ها می‌باشد. بر مبنای این روش علاوه بر اینکه می‌توان قوس و خاکریز پل را مدل کرد، می‌توان اتصالات بین سنگ‌ها با یکدیگر و اتصالات بین قوس و خاکریز را مدل نمود و در هر قسمت از رفتار غیرخطی استفاده کرد [۸].

با توجه به جمع موارد مطرح شده در این قسمت و محاسن برشمرده شده برای روش اجزا محدود در مقایسه با سایر روش‌ها، به منظور تحلیل و بررسی مدل‌های استفاده شده در این پایان نامه از تحلیل مدل‌ها در نرم افزار SAP2000 و بر مبنای روش اجزا محدود استفاده شده است.

۱-۶- روش انجام این تحقیق

برای بررسی میزان کارایی سازه ای و مقایسه اقتصادی روش‌های تسلیح فولادی پل‌های قوسی سنگی (به صورت جزئی و کلی) با روشی همچون استفاده از صفحات پلیمری FRP^۱ است. بدین منظور ابتدا یک پل قوسی سنگی مینا را انتخاب کرده و در نرم افزار SAP2000 مدل نموده و بارگذاری‌های وارده بر پل بر مدل اعمال می‌گردد و نتایج ایجاد شده با مقادیر گزارش شده از تحقیق مشابهی مقایسه می‌شود تا صحت روند مدل سازی در نرم افزار SAP2000 تایید گردد. در ادامه مدل مزبور در دو حالت فقط تحت بارگذاری ثقیلی و تحت بارگذاری ثقیلی و لرزه‌ای تحلیل شده و نتایج تحلیل برای موارد مقاوم سازی شده جزئی (استفاده از میلگردهای خمیده متصل به قوس) و کلی (استفاده از ورق‌های فولادی متصل به قوس و ورق در کنار ستون فلزی)، بدست می‌آید. در نهایت با مقایسه پاسخ‌های تحلیل و هزینه انجام این روش‌ها برآوردی از میزان کارایی هر روش بدست می‌آید.

^۱ Fiber Reinforced Polymers

۱-۷- ساختار این پایان نامه

این پایان نامه مشتمل بر ۶ فصل بوده که در فصل اول ضمن بیان تاریخچه ای از مهندسی پل با انواع پل ها، بارهای وارد بر پل، خسارت های وارده بر پل ها و انواع روش های تحلیل و بررسی رفتار پل ها ارائه می گردد.

در فصل دوم مروری بر ادبیات فنی مرتبط به پل های قوسی شده و همچنین پیشینه ای از تحقیقات انجام شده در گذشته ارائه می گردد.

در فصل سوم انواع روش های تحلیل و بررسی پل های قوسی و پل های ساخته شده از مصالح بنایی شرح داده شده است.

در فصل چهارم انواع روش های ارائه شده برای مقاوم سازی پل های که تاکنون توسط محققین مختلف ارائه شده بیان گردیده است.

در فصل پنجم ضمن معرفی مشخصات پل قوسی سنگی استفاده شده در این تحقیق، روند مدل سازی آن در نرم افزار SAP2000 بیان و همچنین دو مدل براساس تسلیح جزئی و کلی قوس برای مقاوم سازی آن ارائه شده است. در انتهای این فصل نتایج تحلیل مدل ها ارائه شده و با برآوردی از هزینه اجرا، مقایسه ای از کارایی این روش ها انجام می شود.

در فصل ششم ضمن ارائه نتایج کلی بدست آمده در این تحقیق، پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی بیان شده است.

فصل دوم:

مروری بر ادبیات فنی موضوع و پیشینه تحقیق

۱-۲- مقدمه

امروزه حفاظت از سازه‌های معماری قدیمی (باستانی) به عنوان بخشی از میراث فرهنگی بشر بسیار رایج شده است. چرا که علاوه بر ارزش تاریخی و فرهنگی این بناها، امروزه بسیاری از آنها به دلیل جذب گردشگر دارای ارزش اقتصادی قابل توجهی بوده که سبب توسعه شهرهایی که این بناها در آنها واقع شده اند می شوند.

برای این دسته از سازه‌ها در عرصه بین المللی پل **Ponte Vecchio** در شهر فلورانس ایتالیا است که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. این پل نه تنها از جاذبه های گردشگری این شهر است، بلکه به دلیل فرهنگی و تاریخی برای مردم و ساکنان این شهر نیز بسیار ارزشمند است. این پل که در سال ۹۹۶ پس از میلاد احداث گردیده ، پس از جنگ جهانی دوم و ویرانی های آن، تنها قسمت سالم باقی مانده در شهر بوده و به دلایل نامعلومی نازی‌ها آن را از بین نبرده اند [۱۰].



شکل ۱-۲- پل **Ponte Vecchio** واقع در شهر فلورانس ایتالیا ساخته شده در ۹۹۶ پس از میلاد [۱۰]

به عنوان نمونه ای دیگر می توان به پل استرلینگ در اسکاتلند اشاره نمود (شکل ۲-۲). این پل محل جنگی موسوم به استرلینگ در سال ۱۲۹۷ میلادی بوده که اولین جنگ برای استقلال اسکاتلند می باشد. امروزه هر اسکاتلندی این پل را به عنوان نمادی برای آغاز مبارزه خود برای رسیدن به استقلال می داند [۱۰].



شکل ۲-۲- پل استرلینگ واقع در اسکاتلند [۱۰]

به عنوان نمونه ایرانی این دسته از سازه ها می توان به پل ورسک موسوم به پل پیروزی اشاره کرد. این پل که یکی از زیباترین پل های احداث شده در ایران است، ضمن اینکه همچنان مورد استفاده است و نقش مهمی در حمل و نقل ایران بازی می کند، از نحوه ساخت آن تا نقش آن در گذر زمان، در برگیرنده بخشی از تاریخ ایران می باشد. در زمان جنگ جهانی دوم، به منظور رساندن ادوات مورد نیاز شوروی، روزانه ۷۵ قطار (هر ۲۵ دقیقه یک قطار) از روی این پل عبور می کرد.

از این مطالب می توان چنین نتیجه گرفت که این دسته از بناها از حالت سازه صرف خارج شده و بخشی از علایق، فرهنگ و تاریخ یک ملت شده اند که در نتیجه حفظ و نگهداری از آنها حائز اهمیت است. از این قبیل سازه ها و به ویژه پل های تاریخی در ایران به تعداد زیادی وجود دارد.

بحث مهمی که در بهسازی و تعمیر سازه های تاریخی وجود دارد این است که روند بازسازی و تعمیر به گونه ای انجام شود که به روح و اصالت بنا کمترین آسیب وارد شده و ساختار بنا به همان شکل سنتی خود باقی بماند. از طرفی دیگر بسیاری از سازه های قدیمی و تاریخی که ممکن است به دلایل مختلف چون جنگ، خرابی های طبیعی و یا سایر علل، دچار آسیب شده و در نتیجه نیازمند تعمیر باشند، امروزه همچنان مورد استفاده قرار می گیرند و لذا فعالیت های بازسازی می بایستی به گونه ای باشد که اخلاقی در عملکرد و بهره وری این سازه ها ایجاد نکند. تهیه یک چنین طرح های بهسازی و تعمیر و مقاوم سازی که شرایط بالا را برآورده کند نیازمند همکاری مهندسان سازه و معماران می باشد.

در بعضی از موارد به جای تعمیر تصمیم به بازسازی قسمت آسیب دیده پل گرفته می شود. مثلاً پل نشان داده شده در شکل ۳-۲ که به علت تخریب یک دهانه آن در بین اهالی محلی به پل شکسته معروف شده بود، هنگامی که به فکر بازیابی قابلیت پل

به عنوان پل عابر پیاده بودند برای اینکه اسم پل با بنای مرمت شده سازگار باشد دهانه پل را به صورت شکل ۲-۴ احداث نمودند تا وضعیت پل شکسته همچنان در پل بازسازی شده هم مشاهده شده و برای نسلهای بعد نیز باقی بماند [۱۰].



شکل ۲-۳- نمایی از پل موسوم به پل شکسته قبل از انجام عملیات مرمت [۱۰]



شکل ۲-۴- پل شکسته پس از بازسازی (روند بازسازی به گونه ای انجام شده که شکسته بودن پل معلوم باشد) [۱۰]

تمرکز این پایان نامه بر روی بررسی رفتار و ارائه روش‌های مقاوم سازی پل‌های قوسی سنگی است. این دسته از پل‌ها اکثراً قدیمی بوده چراکه امروزه به دلیل وجود مصالح رایج تر و مستحکم تر نظیر فولاد و بتن، کمتر این دسته از پل‌ها احداث می‌گردند. بنابراین علاوه بر اینکه مطالب عنوان شده درباره بناهای قدیمی از قبیل پیوند خوردن این بناها با فرهنگ و تاریخ یک ملت در مورد آنها نیز صدق می‌کند، بسیاری از این پل‌ها همچنان مورد استفاده قرار گرفته و وسیله ارتباطی میان مردم بوده به طوریکه خرابی

آنها موجب اخلاص فعالیت‌های انسانی می‌گردد. این درحالی است که امروزه به دلیل افزایش جمعیت، بار ترافیکی (بارزنده) بر روی این پلها به شدت افزایش یافته است و در مقابل به دلیل عدم مراقبت و توجه به آنها در گذشته، عواملی نظیر هوازدگی، تخریب‌هایی را در بخش‌های مختلف این پلها ایجاد کرده است، که این تخریب‌ها در ترکیب با آن بارهای اضافی وارده بر پلها می‌تواند سبب تخریب و فروپاشی کلی این دسته از پلها گردد.

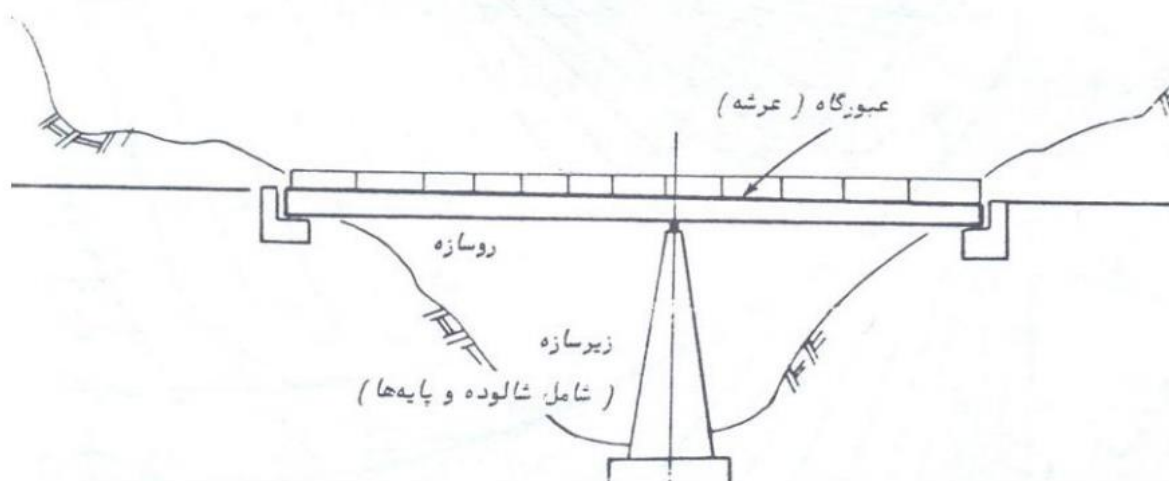
در قدیم به دلیل استفاده از مصالح سنتی نظیر سنگ، آجر و ... در ساخت پل‌ها و ضعف این مصالح در مقاومت کششی، احداث پل به صورت قوسی بسیار رایج بوده است چراکه قوس فرم هندسی است که می‌تواند بارها را فقط در فشار تحمل کند. ورود مصالح جدید نظیر فولاد، بتن، بتن آرمه و کابلهای پرمقاومت سبب شدند فرم‌های سازه‌ای دیگری برای پلها ارائه گردند. هرچند در طول این دوره جدید نیز همچنان پل‌های قوسی از فولاد و بتن احداث می‌شدند. در سالهای اخیر در بریتانیا و پرتغال دوباره ساخت پلهای قوسی سنگی رایج شده است. چرا که امروزه با گسترش روزافزون مشکلات زیست محیطی استفاده از مصالحی در ساخت بناها که سازگاری بیشتری با محیط زیست داشته باشند در اولویت است. نمونه‌ای از این سازگاری با طبیعت در پل قوسی سنگی واقع در کشور سوئد نشان داده شده است (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵- دو نمای از پل قوسی سنگی در کشور سوئد و سازگاری آن با طبیعت اطراف [۱۱]

۲-۲- طبقه بندی پل ها

پل را می توان سیستم سازه ای تعریف کرد شامل روسازه و زیرسازه که روسازه این وظیفه را برعهده دارد که بارهای وارده بر عرشه را به صورت ایمن به زیرسازه شامل پایه های پل و فونداسیون منتقل نماید (شکل ۱-۶). بر این اساس پلها را می توان از منظرهای گوناگونی طبقه بندی نمود که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می شود. [۱]



شکل ۲-۶- تقسیم بندی سازه ای پل

۲-۲-۱- طبقه بندی پل از نقطه نظر طول دهانه

پلها از منظر طول دهانه به انواع:

- ۱- دهانه کوتاه (زیر ۱۰ متر)
- ۲- دهانه متعارف، حداکثر تا ۱۵۰ متر، اکثراً شامل پل های عرشه ای که طراحی آنها بر اساس آیین نامه های طراحی پل امکان پذیر است.
- ۳- دهانه بلند، با دهانه بزرگتر از ۱۵۰ متر اکثراً شامل سیستم های معلق که طراحی آنها مستلزم داشتن دانش و تجربه زیادی است.

۲-۲-۲- طبقه بندی پل از منظر سیستم سازه ای

- ۱- پل های صفحه ای (ساخته شده از بتن مسلح)
- ۲- پل های دال و شاهتیر (ساخته شده از فولاد، بتن مسلح و یا ترکیب بتن و فولاد)

- ۳- پل‌های خربایی
- ۴- پل‌های قوسی (طاقی)
- ۵- پل‌های خربایی طره ای
- ۶- پل‌های معلق
- ۷- پل‌های ترکیه ای با کابل‌های کشیده
- ۸- پل‌های قابی



شکل ۲-۷- پل عابر پیاده ساخته شده از پوسته بتنی در شهر مادرید اسپانیا [۲]

۲-۲-۳- طبقه بندی پل‌ها از نقطه نظر مصالح

پل‌ها از منظر مصالح اصلی سازه ای استفاده شده در ساختشان به دسته های زیر تقسیم می شوند:

- ۱- پل با مصالح بنایی و سستی
- ۲- پل بتن مسلح در دو حالت درجا و پیش ساخته
- ۳- پل بتنی در دو حالت پس کشیده و پیش تنیده
- ۴- پل فولادی
- ۵- پل مرکب فولاد و بتن
- ۶- پل آلومینیومی

۲-۲-۴- طبقه بندی پل از نظر شیوه ساخت

- ۱- اجرای درجا با قالب بندی کامل
- ۲- اجرای پیش ساخته (الف) نصب با جرثقیل، (ب) نصب به شیوه هل دادن
- ۳- اجرای طره ای

۲-۲-۵- طبقه بندی پل از نقطه نظر استفاده

- ۱- پل های عابر پیاده
- ۲- پل های جاده
- ۳- پل های راه آهن
- ۴- پل های رودخانه ای
- ۵- پل های روگذر- زیرگذر شاهراه
- ۶- پل های عبور خط لوله آب، نفت، گاز و ...

۲-۳- پل های قوسی (طاقی)

استفاده از قوس یا طاق به عنوان سازه ای که می تواند بدون استفاده از ساز و کار خمشی و فقط با اتکا به ساز و کار نیروی محوری فشاری بین دو نقطه دهانه بزند، از دیرباز مورد شناخت بشر بوده است. سابقه استفاده از طاق با مصالح سنگی به قبل از میلاد مسیح می رسد. تا حدود سال ۱۸۰۰ میلادی سازه طاقی با مصالح سنگی همچنان به عنوان تنها روش پل زنی بین دو نقطه بوده است. با تولید آهن نه تنها از اهمیت این دسته از پلها کاسته نشد، بلکه با استفاده از این نوع مصالح، چالش جدیدی برای استفاده از این نوع سازه برای دهانه های بزرگتر آغاز گردید.

در راه آهن سراسری ایران که قدمت آن به حدود ۹۰ سال می رسد، پل های طاقی بسیار زیبایی از مصالح سنگی وجود دارد. از جمله این پل ها می توان به پل ورسک در مسیر راه آهن تهران به ساری اشاره نمود.



شکل ۲-۸- پل راه آهن ورسک به طول دهانه ۶۶ متر ساخته شده از مصالح بنایی سنتی چون سیمان و آجر

۲-۳-۱- انواع پل های طاقی

پل های طاقی را می توان از نقطه نظرهای مختلفی طبقه بندی نمود که در ادامه به تعدادی از این موارد اشاره می شود:

۲-۳-۱-۱- از منظر مصالح استفاده شده در ساخت پل

قوس را می توان از مصالح بنایی (سنگی یا آجری، بتن غیرمسلح)، بتن مسلح و فولاد ساخت.



شکل ۲-۹- پل قوسی فلزی قطور خوی در آذربایجان غربی به طول ۴۴۸ متر قرار گرفته بر روی پایه های بتنی

۲-۳-۱-۲- از نظر سازه ای

قوس ها از منظر سازه ای به دسته های زیر تقسیم می شوند:

(الف) قوس سه مفصل (معین)

(ب) قوس دومفصل (یک درجه نامعین)

(ج) قوس دوسرگردار بدون مفصل (سه درجه نامعین)

(د) قوس مهارشده (یک درجه نامعین)

۲-۳-۱-۳- طبقه بندی پل های قوسی از منظر هندسی

(الف) پل قوسی بالاگذر

(ب) پل قوسی میان گذر

(ج) پل قوسی با عرشه معلق



شکل ۲-۱۰- پل قوسی فلزی با عرشه معلق واقع در شهر آمل

۲-۳-۲- دهانه پل های قوسی

پلهای قوسی از دهانه حدود ۴ متر تحت عنوان آبگذرهای طاقی تا دهانه ۵۰۰ متر در دنیا ساخته شده اند. قوس های سنگی در دهانه های کوچک و متوسط ۴ تا ۴۰ متر، قوس های بتن آرمه در دهانه های متوسط ۴۰ تا ۱۰۰ متر، قوس های فولادی (از نوع تیورق فولادی) در دهانه های متوسط و بلند (۴۰ تا ۲۰۰ متر) و قوسهای فولادی خرپایی در دهانه های بزرگ ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر مورد استفاده قرار می گیرند.[۱]

۲-۴- بارهای وارد بر پل

بارهای وارد بر پل به سه دسته اصلی زیر تقسیم می شوند:

۱- بارهای قائم که شامل بارهای مرده، زنده و موارد مشابه می باشند که در امتداد ثقل اثر نموده و عرشه و پایه های پل را تحت تاثیر قرار می دهند. این بارها در طراحی عرشه پل نقش اصلی را داشته و از طریق عرشه به پایه ها اعمال می شوند.

۲- بارهای جانبی که شامل بارهایی نظیر بار باد، زلزله، فشار جانبی خاک، نیروی جریان، نیروی گریز از مرکز، نیروی ترمز، نیروی برخورد و موارد مشابه می باشند و معمولاً پایه های پل را تحت تاثیر قرار می دهند. در واقع این نیروها در عرشه ایجاد می شوند، لیکن عامل اصلی مقاومت در مقابل آنها پایه های پل می باشد.

۳- بارهای خودکرنشی که شامل آثار دما، خزش، تغییر طول ناشی از پیش تنیدگی و موارد مشابه می باشند. این دسته از بارها می توانند باعث ایجاد تغییرشکل در تمام سازه ها (اعم از معین و نامعین) و ایجاد نیروهای داخلی در سازه های نامعین گردند.

در حالت کلی مطابق آیین نامه آشتو [۳] و آیین نامه بارگذاری پل ها (نشریه ۱۳۹ سازمان برنامه ریزی و مدیریت کشور) [۴]، بارهای محاسباتی اصلی موثر در طراحی پلها عبارتند از :

بارهای دائمی (بار مرده)
بار بهره برداری و هرگونه اثر مربوط به آنها مانند اثر ضربه، ترمز و نیروی گریز از مرکز
بارهای وارد بر پیاده رو
اثر باد
اثر تغییرات دما
اثر غوطه وری و جریان آب
اثر تغییرشکلهای ایجاد شده در مصالح تابع زمان
اثر نشست یا کوتاه شدن پایه ها
اثر زمین لرزه
بارهای وارد بر جان پناه و نرده ها
بارهای ویژه مانند اثر برخورد وسایل نقلیه، کشتی ها و قطعات یخ به پایه های پل

۲-۵- مزایا و معایب پل های قوسی

تمام راه حل های بیولوژیکی و سیستم های فنی دارای مزایا و معایب مختص به خود هستند. یکی از مزیت های پل های قوسی زیبایی آنها بوده که قطعاً از این مزیت نمی توان به راحتی چشم پوشی کرد. علاوه بر زیبایی می توان مزایای دیگر پل های قوسی به صورت زیر برشمرد [۱۱ و ۱۲]:

۱- امکان ساخت با مصالح متعدد و عدم نیاز به ماده خاص در ساخت آنها

- ۲- تغییر شکل محدود تحت بارهای ترافیکی (حدود ۱۰ میلیمتر در پل‌های راه آهن)
- ۳- قابلیت استفاده و پدیده خستگی در این پلها ارتباطی با یکدیگر ندارند (کرنش‌های کلی اغلب در محدوده بارفشاری چرخه ای)
- ۴- ایمنی و مقاومت بالا در مقابل شکست (غیرحساس به عوامل برنامه ریزی نشده)
- ۵- داشتن گستره تحمل آسیب بالا
- ۶- امکان مشاهده نشانه های اولیه ای از خرابی در این پلها این مزیت را داشته که پیش از گسترش خرابی و یا فروپاشی کلی سازه، به تعمیر و بهسازی آن بپردازیم.
- ۷- دارا بودن از دوره عمر طولانی
- ۸- پل‌های قوسی مثل همه پل‌های عرشه ای امکان دیدن مناظر طبیعی دست نخورده را برای استفاده کنندگان از پل فراهم می کند.
- ۹- مواد استفاده شده در ساخت و ساز می تواند دور انداخته شوند و یا دوباره مورد استفاده قرار گیرند بدون اینکه به محیط زیست اطراف آسیب وارد کنند.

در مقابل این مزایا، معایبی نیز برای پل‌های قوسی برشمرده شده است [۱۱ و ۱۲]:

- ۱- کاهش قابل توجه در ظرفیت باربری به دلیل جابجایی های بزرگ تکیه گاهی (این حالت در همه پلها صادق است)
- ۲- زمان ساخت طولانی (پل‌های قوسی نیازمند روش ساخت دقیق و بسیار ویژه هستند که به همین دلیل مدت زمان بیشتری برای ساخت آنها در مقایسه با سایر فرم های سازه ای استفاده شده در پل سازی، صرف می شود)
- ۳- نیازمند نگهداری و مراقبت منظم هستند به ویژه در پل های ساخته شده از مصالح سنتی (چرا که مقاومت کل این پلها وابستگی زیادی به عملکرد یکپارچه اعضا در کنار هم دارد و بنابراین ضعف در یک بلوک همچون ترک خوردگی می تواند ایمنی کل پل را به خطر اندازد)
- ۴- محدودیت در طول پل (با توجه به حجم مصالح مورد نیاز و روشی که در ساخت پل های قوسی استفاده شده، طول این پلها می تواند خیلی کوتاه باشد. این امر باعث می شود که این پلها برای آبراهه های کوچک، رودخانه ها و یا دریاچه ها مناسب باشند).

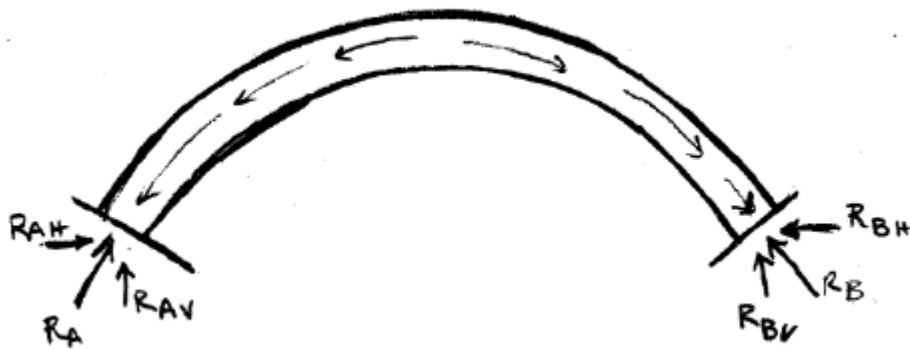
۲-۶- شناخت سازه ای قوس

به طور کلی اجزای اصلی پل های با مصالح بنایی عبارتند از: قوس یا طاق سنگی، خاکریز روی قوس، فونداسیون، دیوارهای جناحی، اسپندردل که این اجزا در شکل مشخص شده اند.

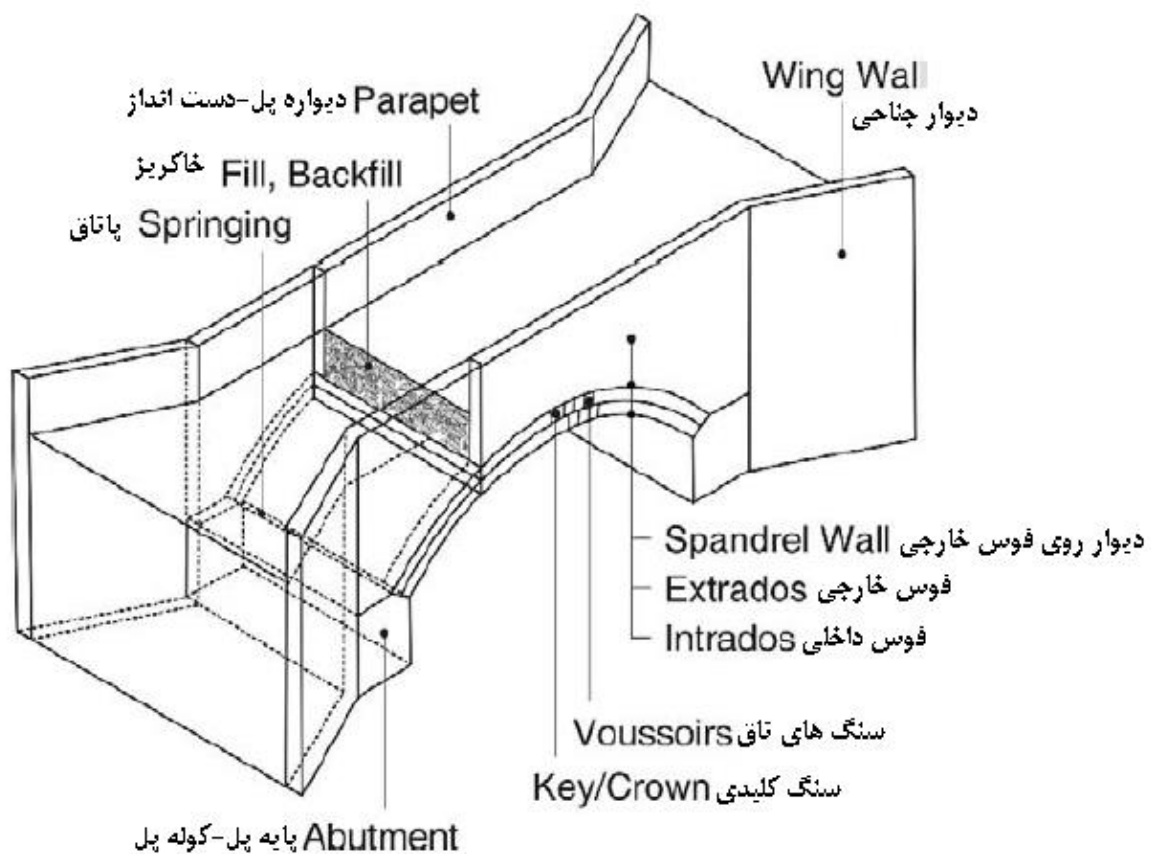
"و بر" قوس را اینگونه تعریف می کند:

قوس فرم هندسی سازه ای است که همچون میله ای به شکل مقعر درآمده و توسط دو تکیه گاه در دو انتهای میله نگه داشته شده باشد. بارهای وارد بر قوس بر تکیه گاه های انتهایی نیروی فشاری رو به بیرون وارد کرده و سازه قوس با عملکرد فشاری آنها را تحمل می کند (شکل ۲-۱۱). به دلیل همین نیروی رانشی وارده بر کوله های یک پل قوسی از سوی قوس است که می بایستی، کوله های پل به درستی مهار شده باشند. در شکل ۲-۱۲ قسمت های مختلف یک پل قوسی نشان داده شده است.

[۱۱ و ۱۲]



شکل ۲-۱۱- نحوه تحمل و انتقال بار در یک قوس [۱۶]



شکل ۲-۱۲- قسمت های مختلف پل قوسی [۱۳]

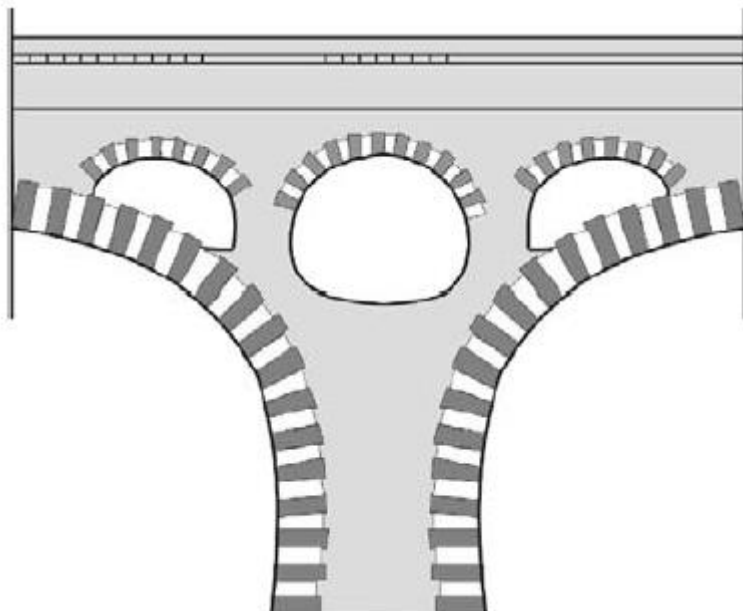
کوله پل، دیوار حائلی است که تکیه گاه طرفین پل بوده و بار عرشه آن را تحمل کرده و به سطح بستر که خاک یا سنگ باشد منتقل می‌کند. در واقع کوله پل به صورت همزمان نقش دیوار حائل و نقش دیوار باربر جهت انتقال بارهای قائم را ایفا می‌کند. کوله ها دارای انواع مختلفی بوده و طبقه بندی آنها معمولاً برحسب موقعیت کوله نسبت به ورودی پل انجام می‌شود. رایج ترین انواع کوله ها عبارتند از: [۱۴]

- ۱- کوله ثقلی : فشار افقی خاک را از طریق وزن خود تحمل می‌کند.
- ۲- کوله تمام قد : کوله ای که از خط تراز زیرگذر تا خط تراز جاده روگذر امتداد یافته است.
- ۳- کوله پشت بند دار: کوله ای مشابه دیوار حائل پشت بند دار است.
- ۴- کوله میان باز: کوله ای با فضای میانی باز می باشد.
- ۵- کوله دیوار مسلح : کوله هایی که با استفاده از دیوارهای مسلح شده با تسمه های فلزی احداث می شوند.

قوس خارجی، سطح خارجی و نمایان قوس می باشد.

خاکریز، خاک یا سنگ و یا دیگر مصالحی که برای بالا آوردن ارتفاع زمین استفاده می شود. روند خاکریزی می تواند از منظر (الف) روش استفاده شده و (ب) مصالح به کاررفته، به صورت کاملاً متفاوتی انجام شود. چند نوع از خاکریزها عبارتند از:

- ۱- استفاده از مصالح شل و با چسبندگی کم
- ۲- استفاده از خاک مسلح شده با روش تزریق
- ۳- استفاده از سوراخ ها و بازشوهایی در سطح خاکریز برای کاهش حجم مصالح پرکننده استفاده شده و در نتیجه کاهش وزن پل. همانطور که شکل ۲-۱۳ مشاهده می شود برای ایجاد بازشوها در قسمت خاکریز پل از قوس های طولی اضافی استفاده شده است.

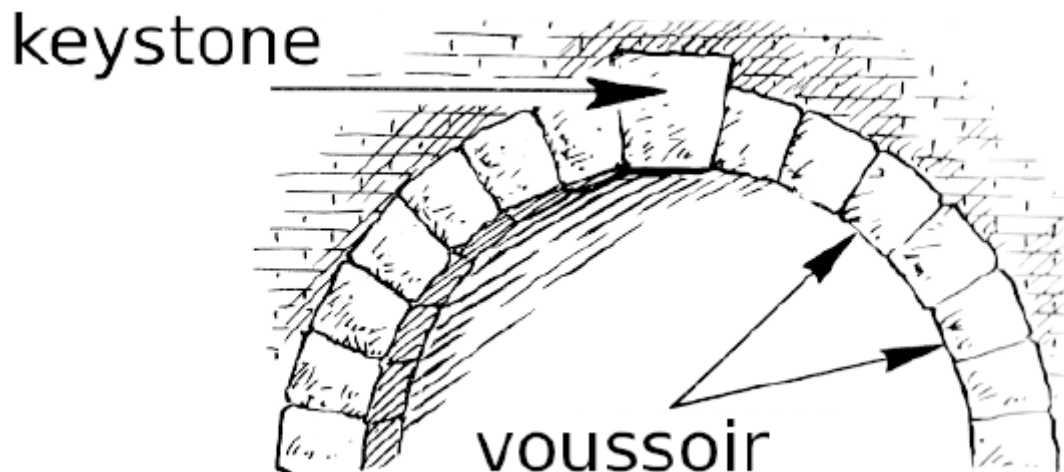


شکل ۲-۱۳- ایجاد بازشوها و سوراخ هایی در بخش خاکریزی پل های قوسی برای کاهش حجم مصالح استفاده شده

[۱۵و۱۱]

قوس داخلی، سطح داخلی یک قوس می باشد.

سنگ سرطاق (سنگ کلیدی) همانطور که در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است، سنگ گوه ای شکلی است که در تاج یک قوس قرار داده شده و سنگ های طرفین را در محل خود حفظ می کند [۱۴]. به هریک از بلوک های تشکیل دهنده یک قوس سنگ طاق گفته می شود.



شکل ۲-۱۴- مشخص کردن سنگ سرطاق در یک پل قوسی سنگی [۱۴]

جان پناه (دست انداز): دیوار کوتاهی که در اطراف لبه عرشه پل ایجاد می شود تا از وسایل نقلیه و پیاده روها در برابر سقوط محافظت نماید.

ناحیه تقریباً مثلثی بین بالای قوس و زیر عرشه افقی پل را اصطلاحاً اسپندرل گفته که در پل ها به دو صورت باز یا بسته وجود دارد. در حالت بسته در این قسمت از مصالح پرکننده استفاده شده ولی در حالت باز بارها توسط دیوارها یا ستونهای داخلی به قوس منتقل می شوند (شکل ۲-۱۵). [۱۴]



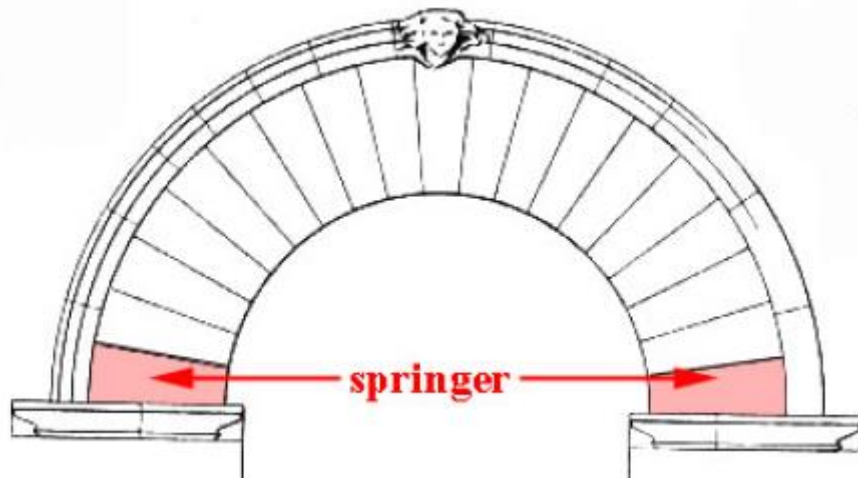
(ب)



(الف)

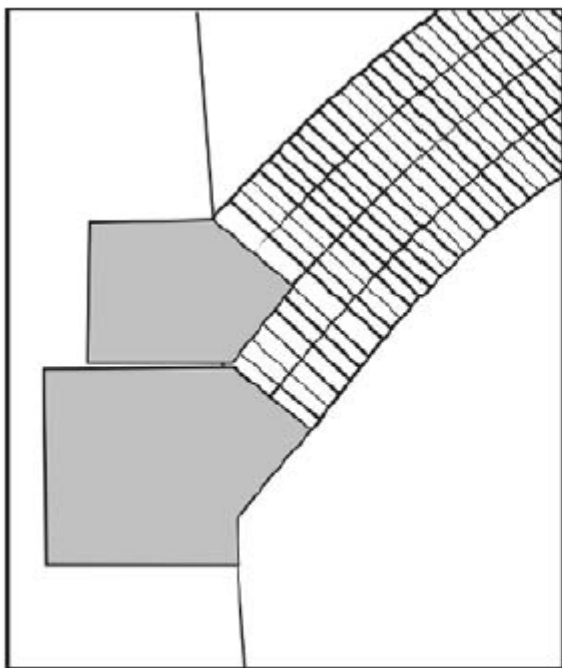
شکل ۲-۱۵- حالت های مختلف اسپندرل در یک پل قوسی، (الف) اسپندرل بسته (ب) اسپندرل باز

بلوک نشیمن، پایین ترین بلوک تشکیل دهنده قوس که بر روی پایه تکیه گاهی قوس قرار می گیرد (شکل ۲-۱۶).

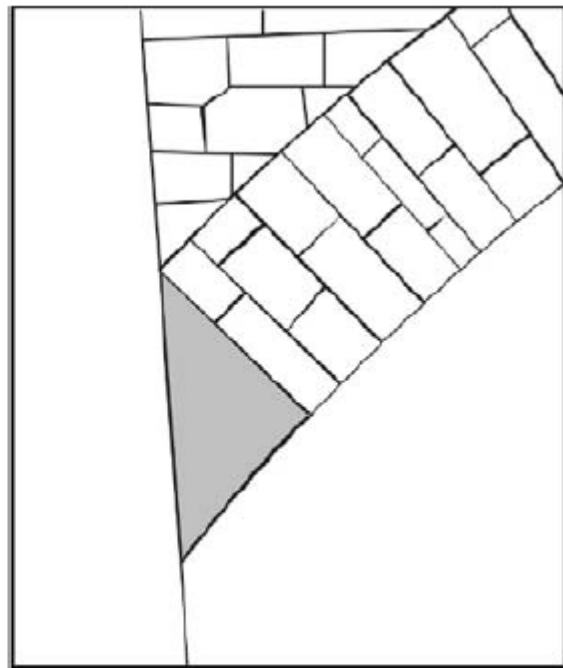


شکل ۲-۱۶- بلوک نشیمن در یک پل قوسی

در شکل ۲-۱۷ انواع روش های اتصال قوس به پایه پل (کوله) توسط سنگ پاطاق نشان داده شده است. در شکل ۲-۱۷- (الف) سنگ پاطاق یک بلوک بیرونی قابل مشاهده است در حالیکه در شکل ۲-۱۷- (ب) از سنگ پاطاق تعبیه شده در داخل کوله استفاده شده است.



(ب)

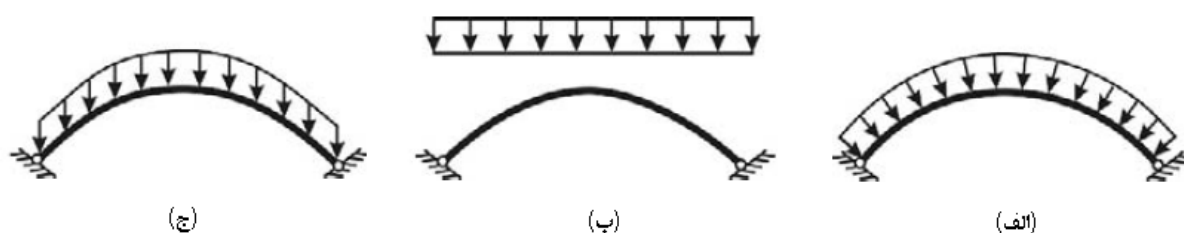


(الف)

شکل ۲-۱۷- انواع حالت های اتصال قوس به پایه پل با استفاده از سنگ پاطاق

۷-۲- انواع مختلف هندسه قوس

همانطور که قبلاً اشاره شد قوسها خطوط خمیده و مقعری هستند که دارای انحنا بوده و همین هندسه قوس را تشکیل می‌دهد. انتخاب میزان انحنا و در نتیجه هندسه قوس بستگی زیادی به بارگذاری وارده بر قوس دارد. شکل ۲-۱۸ سه حالت هندسی مختلف بهینه شده یک قوس را برای سه حالت مختلف بارگذاری نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲-۱۸-الف) مشاهده می‌شود، یک قوس دایره ای، هندسه مناسبی برای قوس تحت اثر بارگذاری شعاعی با شدت ثابت می‌باشد. این در حالی است که قوس سهمی شکل برای باربری یک بار یکنواخت قائم، شکل هندسی مناسب تری است (شکل ۲-۱۸-ب). هنگامی که قوس فقط تحت بار ثابتی معادل وزن و بار مرده قوس است، انتخاب یک قوس زنجیری برای پل هندسه بهینه ای است (شکل ۲-۱۸-ج).



شکل ۲-۱۸- شکل هندسی بهینه قوس تحت حالت های مختلف بارگذاری وارد بر آن

در شرایط واقعی علاوه بر حالت و نحوه بارگذاری وارده بر قوس، محدودیت های ساخت و احداث قوس هم می تواند در شکل هندسی انتخاب شده برای قوس موثر باشد. در جدول ۲-۱ انواع مختلفی از شکل های هندسی قوس ها نشان داده شده است. در این جدول انواعی از قوس های دایره ای، سهموی، بیضوی و دسته زنجیری آورده شده است. قوس دسته زنجیری یک حالت خاصی از قوس دایره ای است که از چند قوس دایره ای با شعاع های مختلف تشکیل شده است. در این جدول قوس هایی به شکل منحنی سینوسی و یا نیم موج برای شکل قوس ارائه شده است.

جدول ۲-۱- انواع شکل های هندسی مختلف قوس [۱۱]

قوس نیم دایره یا قوس ناقص			
Half-circular arch or segmental arch			
Parabolic arch			
قوس سهمی شکل			
قوس بیضی شکل یا بیضی شکل ناقص			
Elliptic arch or elliptic segment arch			
قوس دسته زنجیری			
Basket arch			

کاربرد هریک از این شکل‌های هندسی برای پل‌های قوسی به شدت وابسته به دوره تاریخی است که پل در آن دوره احداث شده است. به عنوان مثال، رومی‌ها به طور عمده از قوس‌های نیم دایره استفاده می‌کردند. اما نیاز به پل‌هایی با طول دهانه بزرگتر در قرن ۱۶ میلادی و پس از آن، سبب شد که شکل‌های هندسی سهمی، بیضی و دسته زنبیلی در میان پل‌سازان آن دوران محبوب شود چرا که استفاده از شکل نیم دایره برای ساخت قوس‌هایی با طول دهانه زیاد سبب افزایش ارتفاع قوس و در نتیجه پل میشد که این امر خود مشکلات فنی و اجرایی زیادی را در روند ساخت چنین پلهایی به وجود می‌آورد. با گذشت زمان و به ویژه در قرون حاضر شکل هندسی پل‌ها تغییر قابل توجهی کرده است. در پل‌های امروزی به دلیل وجود مصالح جدید مثل فولاد و بتن آرمه، دیگر نیاز چندانی به فرم هندسی قوس به منظور تحمل بارهای وارده به پل نبوده و استفاده از این فرم هندسی در ساخت پل‌ها می‌تواند بیشتر دلایل معماری یا افزایش کاربری بنا داشته باشد. همچنین تا قبل از قرن بیستم استفاده از فرم‌های هندسی با طول دهانه بیشتر و ارتفاع کمتر در ساخت پلهای قوسی ادامه می‌یابد که علت این امر را در نیاز بشر برای عبور از دهانه‌های طویل‌تر در مقایسه با پیشینیانش دانست.

برای انتهای یک پل قوسی می‌توان شرایط انتهایی مقید با مفصلی را فراهم نمود. در حالت مفصلی اگرچه پل، آزادی حرکتی و در نتیجه تغییر شکل‌های بیشتری در مقایسه با حالت قوس با انتهای مقید دارد، ولی تحلیل و رفتار آن از پیچیدگی کمتری برخوردار است.

۲-۸- پل‌های قوسی مصالح بنایی

۲-۸-۱- مقدمه

تاریخ استفاده از مصالح بنایی در ساخت سازه‌ها به دیوارهای عمدتاً بنا شده از سنگ یا خاک سفت شده همراه با ملات گل و لای برگشته که دلیل استفاده از ملات هم به منظور افزایش پایداری و ایجاد خاصیت ضدآب بودن به بنا بوده است. هرچند استفاده از سنگ و یا خشت و آجر بستگی به میزان فراوانی هر یک از این مواد اولیه در منطقه ساخت بنا بستگی داشته ولی معمولاً سنگ به خشت و آجر در ساخت بناهای قدیمی ترجیح داده می‌شده است. مرحله بعدی توسعه مصالح بنایی، ورود آهک به عنوان ملات بین بلوک‌ها است. مراحل بعدی پیشرفت در عرصه مصالح بنایی را می‌توان در قرن ۱۸ میلادی و استفاده از سیمان پورتلند به عنوان ملات جسنجو کرد که سبب افزایش قدرت و دوام ساختمان‌ها و پل‌های مصالح بنایی گردید. از آنجاییکه پل‌های مصالح بنایی اغلب از بلوک‌های سنگ یا آجر ساخته شده‌اند که فضای بین بلوک‌ها توسط انواع مختلفی از ملات‌ها می‌تواند پر شده باشد تا این قطعات را به یکدیگر متصل نگه دارد، به دلیل مقاومت کششی پایین سنگ و آجر، شکل‌های سازه‌ای برای این پل‌ها قابل قبول است که بلوک‌ها بار وارده را بیشتر با عملکرد فشاری تحمل کرده و نیروی کششی کمی در بلوک‌ها ایجاد میکند.

براین اساس برای مصالح بنایی استفاده شده در سازه‌ها، سه فرض اساسی زیر را می‌توان داشت: [۶]

- ۱- مصالح استفاده شده فاقد مقاومت کششی هستند.
- ۲- تنش‌های ایجاد شده در بلوک‌های تشکیل دهنده سازه به قدری کوچک بوده که در حد تنش‌های فشاری موثر مصالح استفاده شده قرار می‌گیرد.
- ۳- لغزش رخ نمی‌دهد.

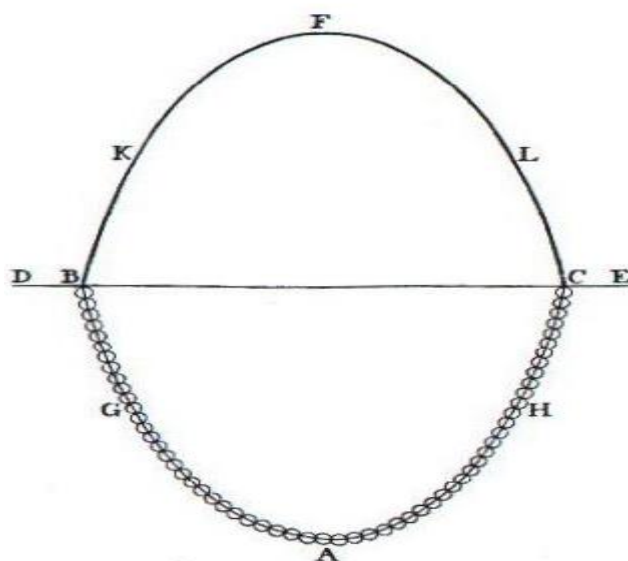
یک سازه هنگامی در حالت کلی مورد تحلیل قرار می‌گیرد تا سه ویژگی (الف) مقاومت بدین معنا که سازه توانایی تحمل و ایستادگی در مقابل بارهای وارده بر خود از جمله بارهای مرده ناشی از مصالح استفاده شده در ساخت سازه و ناشی از کاربری آن و

همچنین دیگر بارهایی که ممکن است در طول عمرش بر آن اثر کنند را داشته باشد. (ب) برخورداری از سختی مناسب بدین معنا که دچار تغییر شکل های بی جهت نشود و (ج) دارای پایداری کافی باشد که در نتیجه شاهد وقوع جابجایی های بزرگ و گسترش آن در طول سازه نباشیم. هرگاه سازه ای این سه شرط را به صورت همزمان برآورده کند می توان اطمینان داشت شرایط کاربری آن به صورت ایمن تضمین شده است. نکته قابل توجه در پلهای قوسی مصالح بنایی این است که امکان دارد، چنانچه شرط اول تامین شود بدین معنا می باشد که تنش های ایجاد شده در قوس تحت بارگذاری وارده کمتر از حد مقاومت فشاری مصالح هستند، ولی با افزایش موضعی بار در یک نقطه، ناپایداری ایجاد شده در آن محل می تواند سبب ناپایداری کلی قوس گردد.

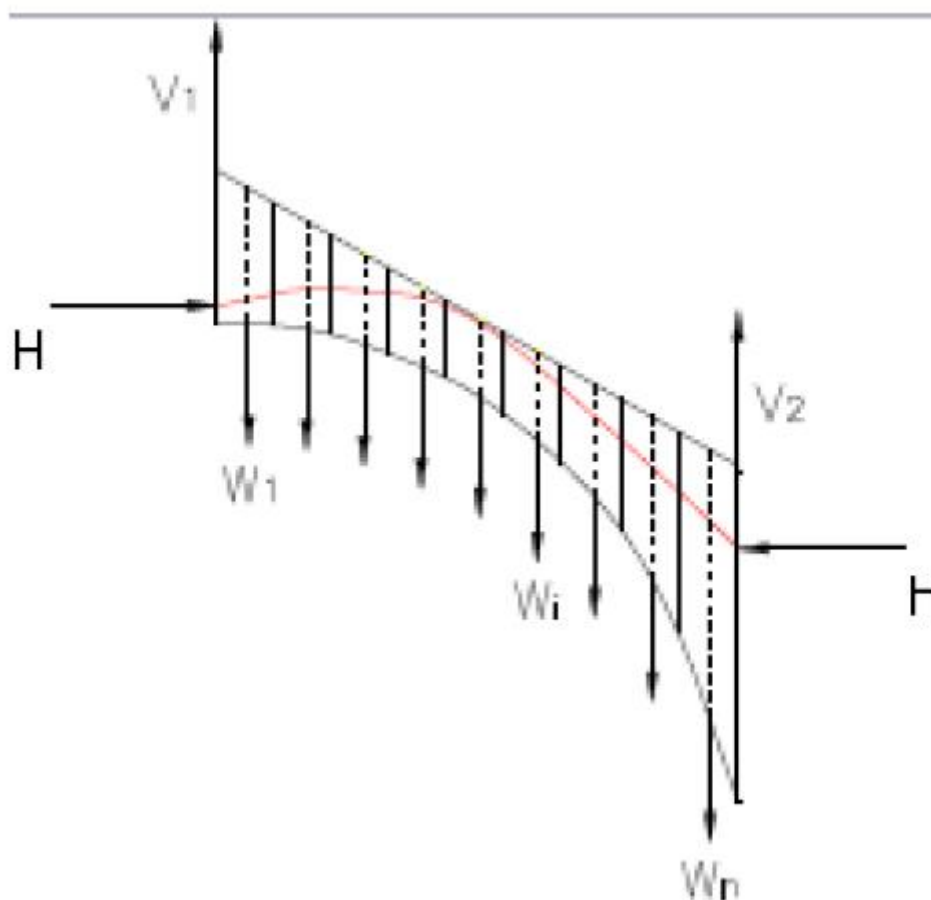
۲-۸-۲- ظرفیت باربری قوس های مصالح بنایی

در بین قسمت های مختلف تشکیل دهنده یک پل قوسی ساخته شده از مصالح بنایی، قوس مهمترین عضو سازه ای است، چرا که عضو اصلی مقاومت در مقابل بارهای وارده به پل است. بنابراین مقاومت این دسته از پلها به مقدار زیادی به هندسه و شرایط تکیه گاه های انتهایی قوس بستگی دارد. مقاومت مصالح استفاده شده در ساخت پل بر روی مقاومت پل، معمولاً در مرتبه بعدی اهمیت قرار دارد. همانطور که قبلاً اشاره شد بارهای وارده بر پل در قوس با یک عملکرد فشاری به تکیه گاه یا پایه پل منتقل شده که این تکیه گاه نیز در قوس یک نیروی عمودی ایجاد می کند. برای اطمینان از عملکرد قابل قبول قوس می بایستی این نیرو در تمام قسمتها با مرکز ثقل مقطع تشکیل دهنده قوس کمترین فاصله را داشته باشد. چرا که در غیر این صورت لنگر خمشی ایجاد شده در مقطع قوس به دلیل بزرگ بودن خروج از مرکزیت ایجاد شده، مقدار قابل توجهی داشته و همین لنگر خمشی سبب شده تا در مقطع قوس تنش های کششی ایجاد گردد که این امر برای قوس های ساخته شده از مصالح بنایی سنتی با مقاومت کششی بسیار ناچیز قابل قبول نمی باشد.

نظریه های اولیه در مورد ظرفیت باربری قوس ها انحصاراً بر مبنای مطالعات و یافته های تجربی استوار بودند. تا اینکه در اواسط قرن ۱۷ میلادی رابرت هوک، راه حلی موسوم به زنجیر معکوس برای تعادل قوسها ارائه نمود (شکل ۲-۱۹). تا قرن ۱۸ میلادی، روش های گرافیکی، روش های اصلی مطالعه رفتار قوس ها بودند. در این روش ها قوس به یک سری بلوک جدا از هم تجزیه شده که خط فشار نتیجه (از به هم وصل کردن نقاط محل اثر) نیروهای برآیند ایجاد شده در هریک از قسمت های مجزای قوس می باشد (شکل ۲-۲۰). فرض پایداری قوس در این روش این است که خط فشار در محدوده قوس باقی بماند.



شکل ۲-۱۹- روش پیشنهادی رابرت هوک برای بررسی تعادل قوس ها موسوم به روش زنجیر معکوس [۱۷۱۰]



شکل ۲-۲۰- تقسیم قوس به بلوک های مجزا برای ترسیم خط فشار [۱۷]

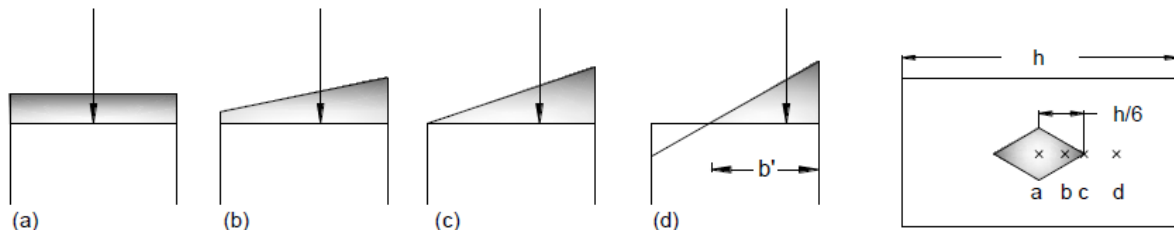
در سال ۱۷۳۰ میلادی "کوپلت" این نظریه را پیشنهاد داد که یک قوس زمانی فرو می ریزد که تعدادی مفصل در طول آن ایجاد گردند و آن را به مکانیزم تبدیل کنند. او همچنین عنوان کرد لحاظ نکردن لغزش بین بلوک های تشکیل دهنده قوس سبب شده مفصلها در وسط و امتداد ۴۵ درجه تشکیل شوند [۱۷]. این نظریه تا به امروز براساس نتایج تجربی بدست آمده تایید شده است.

در سال ۱۷۷۳ میلادی کولمب اولین نظریه عمومی و دقیق درباره پایداری قوس های مصالح بنایی را ارائه نمود. مفروضات اساسی او در این نظریه عبارت بودند از:

- ۱- بعید بودن وجود لغزش میان بلوک های تشکیل دهنده قوس به دلیل وجود نیروی اصطکاک
- ۲- فروپاشی قوس زمانی رخ می دهد که میان قسمت های مختلف قوس چرخش رخ دهد که این امر نیز به دلیل ایجاد تعدادی مفصل در طول قوس است.

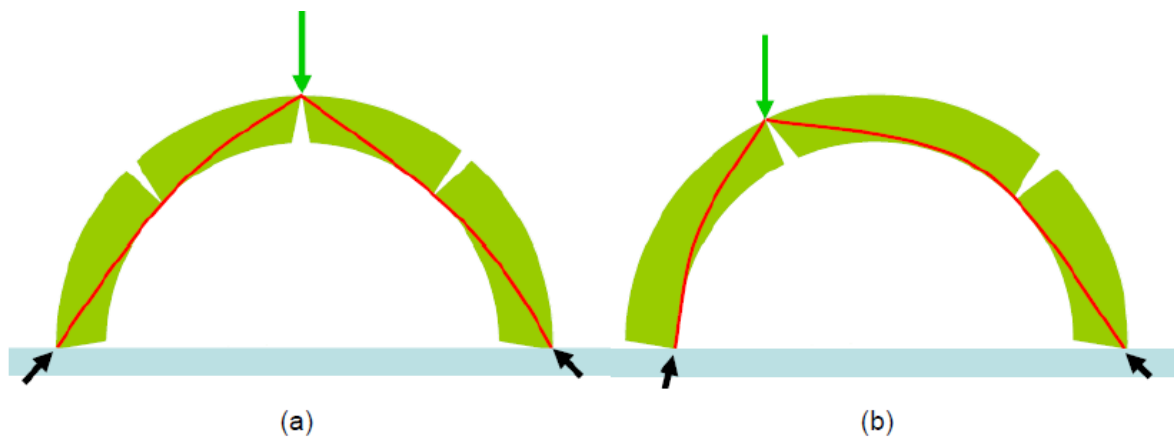
دانشمندان و محققان در این دوره برای اطمینان از پایداری قوس قانون یک سوم میانی را ارائه کردند که چنانچه نیروی فشاری برآیند حاصل از تنش های ایجاد شده در بلوکهای مجزای تشکیل دهنده قوس در ناحیه یک سوم میانی مقطع هر بلوک قرارگیرد،

قوس پایدار خواهد بود و چنانچه در محل اثر این نیروی برآیند در خارج از این ناحیه قرار گیرد به میزان فاصله محل اثرش تا این ناحیه از ایمنی پایداری قوس کاسته می شود (شکل ۲-۲۱).



شکل ۲-۲۱- چگونگی توزیع تنش براساس قانون یک سوم میانی در مقطع یک بلوک از قوس

در قرن ۱۹ میلادی مشخص شد که در یک قوس می بایستی حداقل ۴ مفصل تشکیل شود تا قوس تبدیل به مکانیزم گردد. برخی از حالت های معمول مکانیزم فروپاشی در قوس ها در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است.

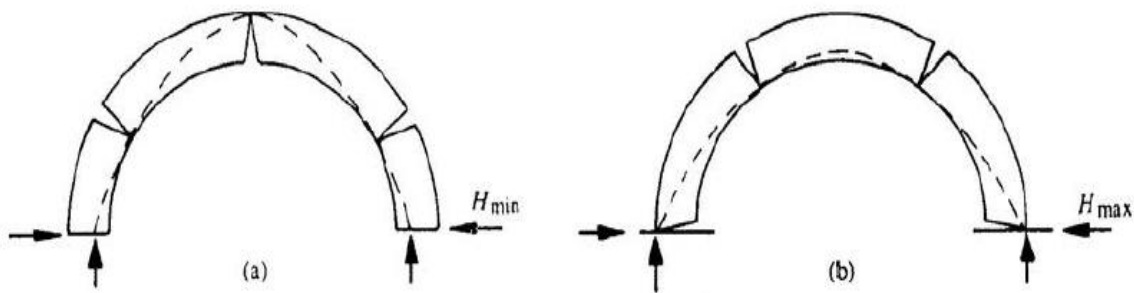


شکل ۲-۲۲- فروپاشی قوس با ایجاد ۴ یا ۵ مفصل در طول قوس [۱۷]

تا اینکه در سال ۱۹۶۶ "ژاک هیمن" روابطی را بر مبنای تئوری پلاستیسیته به جای تئوری الاستیک ارائه نمود. تحلیل های وی بر مبنای فرضیات زیر بودند:

- ۱- تنش های کششی ایجاد شده در مصالح صفر است.
- ۲- مقاومت فشاری مصالح نامحدود (بی نهایت) است.
- ۳- لغزش بین بلوک های سنگ غیرممکن است.
- ۴- شکست، ناشی از تولید مفاصل پلاستیک است.

هیمن بر اساس فرضیات بالا نظریه ای موسوم به حدود بالا و پایین ارائه نمود که تاکنون کاملترین نظریه درباره پایداری قوس ها می باشد. بر اساس این نظریه دو خط فشاری (رانشی) ماکزیمم و مینیمم برای یک قوس تعریف می شود که هرگاه تحت بارگذاری دلخواه وارده بر قوس و خط فشار نظیر آن بارگذاری در محدوده این دو خط فشار حدی قرار گیرد، قوس از پایداری کافی برخوردار است (شکل ۲-۲۳).



شکل ۲-۲۳- قوس نیم دایره تحت وزن خود -خطوط فشار حداقل (a) و حداکثر (b)، "هیمن" ۱۹۹۵ [۱۸]

از بررسی روابط تجربی و تئوریک ارائه شده در تعیین ظرفیت قوس ها که در این قسمت به صورت خلاصه اشاره گردید، درمی یابیم که برخی از معیارهای تجربی همچنان قابل استفاده بوده با این مزیت که به دلیل تجربی بودن از سادگی نیز بهره مند هستند. هرچند با گسترش رایانه ها امروزه استفاده از تئوری های پیچیده امکان پذیر شده و می توان برآورد دقیق تری از رفتار پل های قوسی داشت.

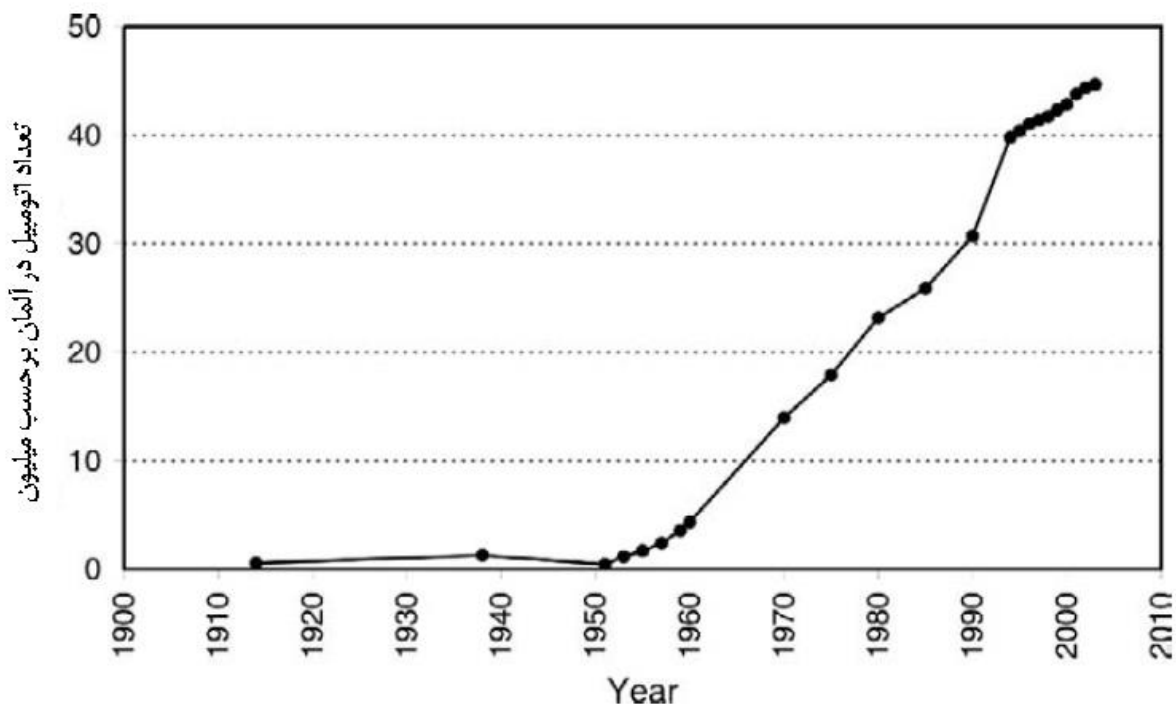
۲-۹- انواع بارهای وارده به پل

همانطور که در قسمت های گذشته نیز اشاره به طراحی پل ها شده است، برای انتقال مناسب انسان و کالا از مسیرهای کوتاهتر نسبت به آنچه مسیر اصلی بین دو نقطه می باشد، این امر پل ها را در معرض بارهای جدید و خاصی علاوه بر بارهای عبوری از پل قرار میدهد. از جمله این بارها می توان به بارهای حرارتی ناشی از تغییر شرایط آب و هوایی، بار برف یا خورشید، بار باد و ... اشاره کرد.

یک پل قوسی تاریخی در مقایسه با یک پل تازه ساخته شده، می بایستی شرایط بارگذاری اش دقیق تر بررسی شود. به عنوان نمونه یک پل تاریخی شاید نتواند بارهای ترافیکی امروزی را تحمل کند ولی عرشه پل تازه ساخت می تواند بار جاده را تحمل کند. در ادامه به معرفی انواع بارهای وارده به یک پل می پردازیم.

۲-۹-۱- بار ترافیکی جاده

از سال ۱۸۸۰ میلادی که بنز اولین ماشین بنزینی خود را در آلمان ارائه کرد تا به امروز، استفاده بشر از خودروها جهش قابل توجهی یافته است. این روند افزایش تولید خودروها در اوایل قرن بیستم کند بوده ولی از اواسط این قرن شتاب قابل توجهی پیدا می کند. شکل ۲-۲۰ نمودار اتومبیل های استفاده شده در آلمان را از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۱ میلادی نشان می دهد.



شکل ۲-۲۴- تغییرات میزان استفاده از اتومبیل در آلمان [۱۹]

علاوه بر تعداد اتومبیل ها، امروزه به دلیل تولید موتورهای قوی و به دلایل اقتصادی امکان حمل و نقل وزن سنگین تری از بار توسط اتومبیل ها فراهم شده است. به طوریکه میزان بار مجاز خودروها افزایش یافته است. در حال حاضر در بزرگراه های آلمان کامیونهایی با وزن مجاز ۱۰۰ تن اجازه تردد دارند. [۲۰] بنابراین در روند طراحی یا مقاوم سازی یک پل مهندسین دخیل می بایستی پیش بینی برای بار ترافیکی عبوری از روی آن پل در آینده داشته و طرح های خود را برای آن میزان بار ارائه کنند. جهت پیش بینی میزان بار ترافیکی از یک سری مدل های ترافیکی که در آیین نامه های معتبر دنیا نظیر DIN آلمان یا Eurocode اروپا آمده است استفاده می شود.

۲-۹-۲- بارگذاری پل براساس آیین نامه ایران (نشریه ۱۳۹)

در این قسمت به معرفی بارهای ارائه شده در آیین نامه بارگذاری پلهای ایران می پردازیم. [۴]

مطابق این آیین نامه بارهای محاسباتی در طراحی پل ها عبارتند از: بارهای دائمی، بارهای بهره برداری و هرگونه اثر مربوط به این دسته از بارها نظیر اثر ضربه، ترمز و نیروی گریز از مرکز، بارهای وارد بر پیاده رو، اثر باد، اثر تغییرات دما، اثر غوطه وری و جریان آب، اثر تغییر شکل های تابع زمان مصالح، اثر نشست یا کوتاه شدن پایه ها، اثر زمین لرزه، بارهای وارد بر چان پناه، بارهای ویژه مانند اثر برخورد وسایل نقلیه و قطعات شناور در آب به پایه های پل و نهایتاً بار برف اشاره کرد.

۲-۹-۲-۱- بارهای دایمی

این بارها وزن، اجزای باربر و غیرباربر تشکیل دهنده پل و نیز خاک روی عرشه پل را شامل می شوند. مقصود از اجزای باربر قطعاتی است که نقش سازه ای داشته باشند و منظور از اجزای غیرباربر قسمت هایی از قبیل پیاده روها، عایق کاری و روکش آسفالت سطح سواره رو، روکش های آبی، جان پناهها، لوله ها و مجاری عبور کابل و سایر تجهیزات شهری که به پل نصب می

شوند. مقدار بار مرده موثر بر پل‌ها به عواملی چون مشخصات هندسی پل، روش اجرا، عمق و مشخصات ژئوتکنیکی خاک بستگی دارد. توصیه بر این است مشخصات خاکریز دوطرف پل به گونه ای انتخاب شود که بتوان مثلاً با متراکم کردن آن قبل از اجرای عرشه، امکان کاهش بار مرده موثر بر پل را فراهم نمود.

۲-۹-۲- بارهای بهره برداری

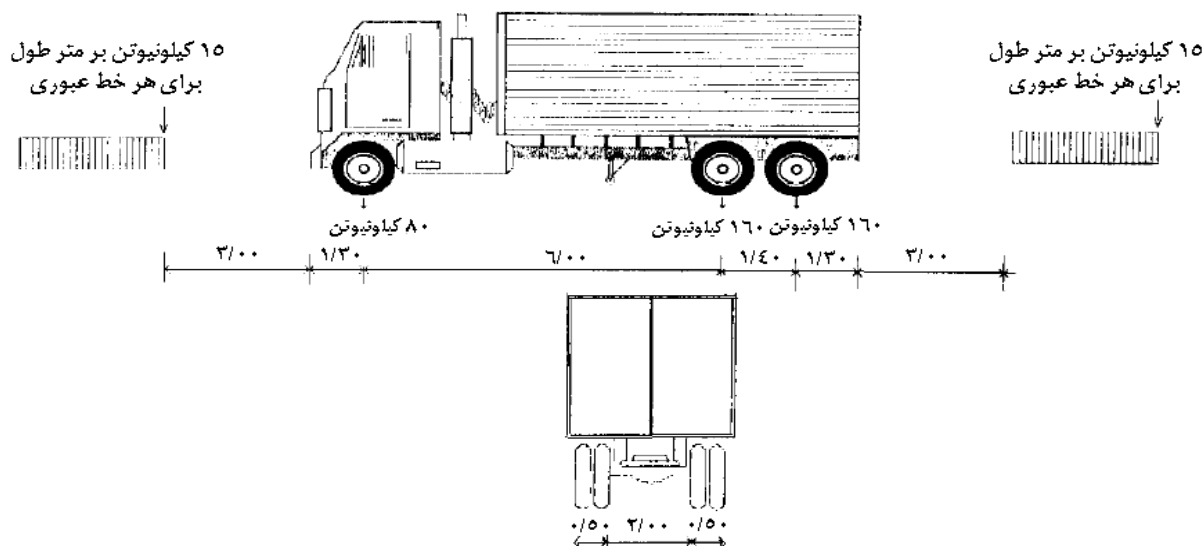
در آیین نامه بارگذاری پل‌های ایران بارهای بهره برداری شامل سه نوع بار فرضی بوده که می بایستی تعداد و موقعیت این بارها به منظور دست یافتن به بحرانی ترین شرایط بر اساس نمودارهای خط تاثیر نیروی های داخلی تعیین گردد. این سه دسته بار فرضی عبارتند از:

بار نوع اول

این بارگذاری که بار عادی نامیده می شود، بیانگر اثر محورهای سنگین قطار، کامیون ها و وسایل نقلیه معمولی است که به طور معمول در سطح راه‌های کشور تردد می کنند و به شرح زیر است:

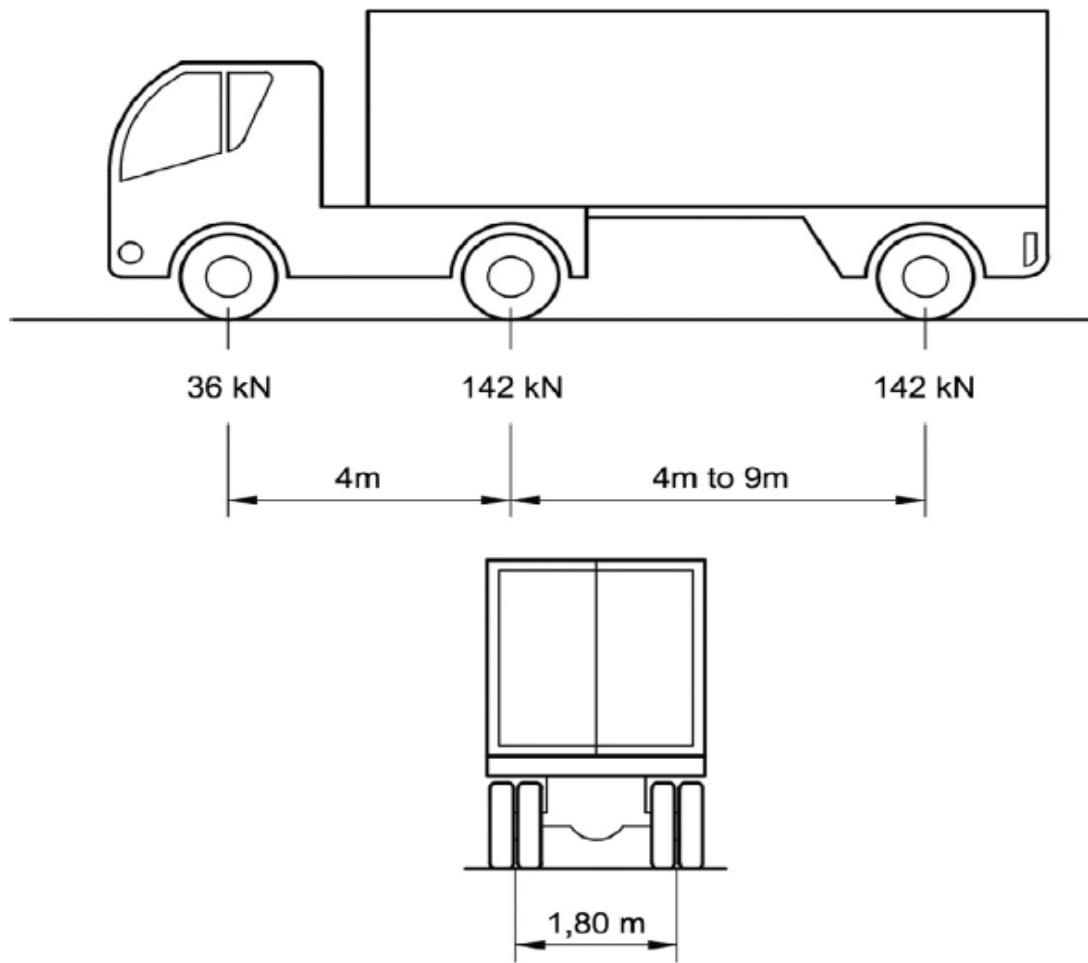
بار عادی هر خط عبور مطابق شکل ۲-۲۵ شامل دو قسمت است:

- ۱- یک کامیون به وزن ۴۰۰ کیلونیوتن و به طول ۱۰ متر که ۳ متر جلو و ۳ متر عقب آن خالی است.
- ۲- در بقیه طول خط عبوری بار یکنواختی به اندازه ۱۵ کیلونیوتن بر متر طول که به طور پیوسته یا ناپیوسته و به طولهای لازم که بحرانی ترین اثر مورد نظر را ایجاد کند، قرار داده می شود.



شکل ۲-۲۵- نحوه مدل کردن بار ناشی از یک کامیون بر روی عرشه پل براساس نشریه ۱۳۹

نحوه بار ترافیکی ارائه شده در آیین نامه AASHTO-2014 به صورت نشان داده شده در شکل ۲-۲۶ می باشد.



شکل ۲-۲۶- مدل بارطراحی ارائه شده در آیین نامه AASHTO-2014 برای یک کامیون سه محوره بر روی عرشه پل [۲۲]

بار نوع دوم

این بار معادل ۸۰ کیلونیوتن است که سطح اثر آن مربعی به ابعاد ۳۰ سانتیمتر فرض می شود و موقعیت آن در محدوده سواره رو متغیر است.

بارنوع سوم

این بار به منظور درنظر گرفتن عبور وسایط نقلیه نظامی بوده و از آن با عنوان بار غیرعادی یاد می شود.

از آنجاییکه بار ناشی از محورهای وسایط نقلیه عبوری از روی عرشه پل، ماهیت دینامیکی دارند، برای درنظر گرفتن این اثر آیین نامه های طراحی ضریبی موسوم به ضریب دینامیکی یا ضربه ارائه کرده اند که می بایستی در بارگذاری عادی ضرب شود. این ضریب در آیین نامه ایران از رابطه (۲-۱) بدست می آید:

$$\delta = 1.3 - 0.005L - 0.15h \geq 1 \quad (2-1)$$

که در رابطه بالا h ارتفاع خاکریز روی پل برحسب متر بوده و مقدار L برحسب متر برای حالت های مختلف به ترتیب زیر تعیین می شود:

(الف) در پل ساده، L همان طول دهانه است.

(ب) در پلهای یکسره یا پیوسته، در محاسبه لنگر خمشی مثبت دهانه L طول دهانه و در محاسبه لنگر خمشی تکیه گاهی، L مقدار متوسط طول های دو دهانه مجاور تکیه گاهی است.

(ج) در مورد تیرهای عرضی و دالها، L طول دهانه مربوطه است.

برای در نظر گرفتن اثر ترمز وسایل نقلیه روی پل، فرض می شود فقط یک نیروی افقی در یکی از خطوط عبور اعمال شود، که مقدار آن از رابطه (۲-۲) بدست می آید:

$$F_I = 200 + 7L_0 \leq 400 \quad (2-2)$$

که در این رابطه L_0 فاصله یک درز انبساط تا درز انبساط بعدی برحسب متر و F_I نیروی ترمز برحسب کیلونیوتن است. حداکثر نیروی ترمز به وزن یک کامیون محاسباتی یعنی ۴۰۰ کیلونیوتن محدود شده و ضریب ضربه نیز بر آن اعمال نمی گردد.

۲-۹-۲-۳- اثر باد بر روی پل

در حالت کلی اثر باد بر پل به عواملی چون موقعیت جغرافیایی، ارتفاع منطقه از سطح دریا، وضعیت توپوگرافی محل و مشخصات هندسی پل بستگی دارد. برای محاسبه بار ناشی از این اثر بر پل از فرض های ساده کننده زیر استفاده می کنیم:

- ۱- امتداد اثر باد افقی است و شدت آن بر روی سطح بادگیر، در دوران بهره برداری بدون بار ترافیک معادل ۲/۵ کیلونیوتن بر مترمربع و با بار ترافیک به میزان ۱/۲۵ کیلونیوتن بر مترمربع بوده که بر مرکز ثقل سطح بادگیر اعمال می شود. بار باد در دو امتداد طولی و عرضی به صورت جداگانه اثر کرده و ترکیب این دو اثر لازم نمی باشد.
- ۲- سطح بادگیر عرشه پل و وسایل نقلیه در امتداد عرضی، سطح نمای قائم آنها در امتداد محور طولی پل بوده و در امتداد طولی نصف همین مقدار در نظر گرفته می شود.
- ۳- سطح بادگیر پایه ها در امتداد عرضی، سطح نمای قائم آنها در امتداد محور طولی پل و در امتداد طولی بزرگترین سطح نمای قائم پایه (سطح واقعی پایه) در نظر گرفته می شود.

۲-۹-۲-۴- اثرات تغییرات دما

تغییرات دما در کوتاه مدت و دراز مدت (روزانه و فصلی) باعث بروز تغییر شکل در اجزای سازه پل می شود. این تغییرات شامل موارد زیر است:

- ۱- اثر تغییر یکنواخت دما باید در محاسبه تمامی اجزای باربر پل مورد توجه قرار گیرد. این تغییرات برای پل های سطحی که خاکریزی روی آنها اجرا نمی شود، معادل ۳۵ درجه سانتیگراد و برای پل های زیرخاکی کم عمق (با ارتفاع خاکریز ۳ متر یا کمتر) معادل ۲۰ درجه سانتیگراد است.
- ۲- اثر اختلاف دما بین سطوح فوقانی و تحتانی عرشه پل با این فرض که تغییر دما در ضخامت مقطع خطی است، در محاسبات وارد می شود. این گرادیان حرارتی تابع موارد زیر است:

(الف) تابش خورشید بر روی سطح فوقانی و سایه در سطح تحتانی عرشه پل

(ب) یخبندان بر روی سطح فوقانی عرشه پل

برخی از محققان در خصوص در نظر گرفتن اثر دما بر روی پل های ساخته شده از مصالح بنایی، کاهش مدول الاستیسیته این مصالح را پیشنهاد داده اند. [۱۱]

۲-۹-۲-۵- اثر نشست یا کوتاه شدن پایه های پل

یکپارچگی استاتیکی پل قوسی به شدت تابع میزان کم تغییر شکل ایجاد شده در پایه و فونداسیون پل است. به همین دلیل است که پل های قوسی معمولاً در مناطقی با زمین نرم ساخته نمی شوند. نشست فونداسیون سبب وارد آمدن آسیب قابل توجهی به پل قوسی می شود. چنانچه نشست یا کوتاه شدگی نامساوی بین دو یا چند پایه پل محتمل باشد باید اثر آن را در طراحی پل منظور نمود. نکته قابل توجه در اینجا این است که معمولاً در پل های تاریخی و قدیمی به دلیل گذشت مدت زمان زیاد از احداث پل، خاک زیر فونداسیون ها نشست خود را داشته و در نتیجه چندان عامل نگران کننده ای نمی باشد، مگر اینکه به خاطر فعالیت های انسانی نظیر خاک برداری در اطراف فونداسیون های پل، شرایط جدیدی تحمیل گردد.

مطالعات موردی انجام شده بر روی پلهای قوسی نشان داده است که نشست پایه ها و فونداسیون پل می تواند تا ۱۵ درصد از ظرفیت باربری نهایی پل بکاهد و با تغییر محل تشکیل مفاصل پلاستیک در طول قوس، کاملاً مکانیزم شکست ایجاد شده در پل را تغییر دهد. [۱۱]

۲-۹-۲-۶- بار برف

اثر بار برف را می توان در طراحی پل ها صرف نظر کرد چرا که منطقی به نظر می رسد در اثر وجود بارش برف سنگین امکان عبور بار ترافیکی از روی پل نخواهد بود. در مقایسه بین بار ترافیکی و بار برف معمولاً بار ترافیکی بیشتر بوده و لذا این بار ملاک طراحی و مقاوم سازی پل می باشد. [۱۱]

۲-۹-۲-۷- اثر زلزله

اثر زلزله می تواند سبب تخریب کامل پل های مصالح بنایی گردد. بیشترین آسیب زلزله بر پل، ناشی از حرکات افقی در جهات طولی و عرضی پل در طول زلزله می باشد. که این حرکات اغلب می تواند یا موجب فروپاشی جزئی پل (از جمله سقوط یکی از دهانه های پل و یا خسارت وارد شده به تکیه گاه ها و پایه های پل) و یا اینکه کل سازه پل فروبریزد. بنابراین مقاوم سازی لرزه ای پل اهمیت فراوانی دارد. [۲۱]

۲-۱۰- مروری بر تحقیقات گذشته

در این قسمت به بررسی تعدادی از تحقیقات انجام شده در زمینه پل های قوسی ساخته شده از مصالح بنایی پرداخته و گزارشی از نتایج تحقیقات مزبور ارائه می شود.

۲-۱۰-۱- مطالعات بررسی و تشخیص

۲-۱۰-۱-۱- مطالعه انجام شده توسط Ural و همکاران [۲۶]

در سال ۲۰۰۸ میلادی Ural و همکاران ضمن بررسی پل‌های قوسی سنگی تاریخی کشور ترکیه، به ارائه گزارشی از انواع خرابی‌های مشاهده شده در این پل‌ها و راهکارهای تعمیر و مقاوم سازی آنها پرداختند.

(الف) انواع دلایل خرابی‌های مشاهده شده در پل‌های قوسی قدیمی ترکیه

۱- نشست‌های تکیه گاهی: در برخی از پل‌ها، پایه‌ها به شدت آسیب دیده بودند که همین امر سبب ایجاد ترک‌های بزرگ در طول قوس شده بود. همچنین تعدادی از سنگ‌های تشکیل دهنده فونداسیون به دلیل نشست رخ داده، از بین رفته بودند. نمونه‌ای از شکست رخ داده در قسمت تحتانی پایه پل را می‌توان در شکل ۲-۲۷ مشاهده کرد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای جلوگیری از گسترش این نشست و همچنین گسترش ترک‌های ایجاد شده و وقوع شکست در پل، بلوک‌های بتنی در اطراف پایه پل اضافه شده‌اند. این راه حل نمی‌تواند دائمی باشد چرا که با اضافه کردن این بلوک‌ها نیز، روند خروج مصالح دانه‌ای تشکیل دهنده پایه پل توسط آب انجام می‌شود.



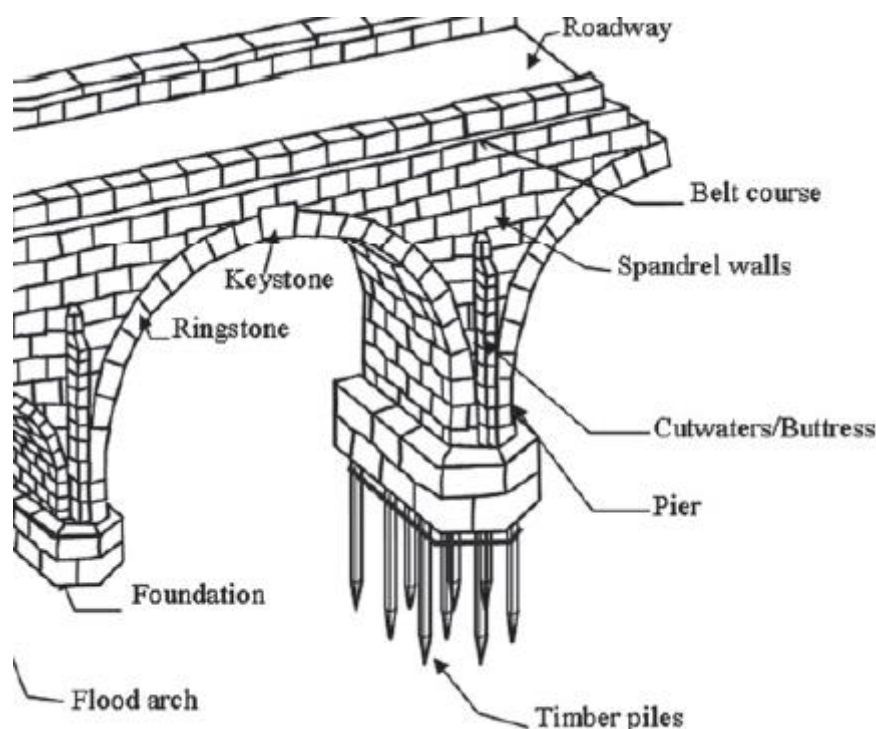
شکل ۲-۲۷- خرابی مشاهده شده در پل "متراسی" ناشی از نشست تکیه گاهی [۲۶]

به طور کلی سه عامل سبب ایجاد خسارات در پل‌ها به دلیل نشست تکیه گاهی می‌شوند:

(الف) عکس‌العمل تکیه گاهی پل بیش از ظرفیت تحمل بار و مقاومت خاک زیر پایه پل باشد. برای جلوگیری از نشست‌های فونداسیون، طراحان قدیمی از شمع‌های چوبی در زیر بلوک‌های سنگی فونداسیون استفاده می‌کردند (شکل ۲-۲۹).

(ب) برداشتن شن و ماسه نزدیک پایه های پل توسط افراد جهت استفاده در ساخت بتن به عنوان سنگدانه، بعضاً سبب این نشست ها و خرابی های ناشی از آن در پل شده است.

(ج) جریان شدید سیل های عبوری در بعضی از موارد باعث خرابی بخش های تحتانی پایه ها شده و یا با سرعت زیادی که دارد بخشی از مواد تشکیل دهنده پایه را با خود می برد.



شکل ۲-۲۸- شکل شماتیک استفاده از شمع های چوبی در قدیم برای تقویت پایه های پل [۲۶]

۲- سیل: هرچند بسیاری از بخش های ترکیه دارای آب و هوای معتدل هستند، ولی در بخش هایی از آن که در نزدیک دریای سیاه قرار دارند، چهار فصل شاهد بارندگی هستیم و همین امر این احتمال را به وجود می آورد که آب رودخانه های این منطقه طغیان کرده و سیل های شدیدی رخ دهد. نمونه ای از شکست ایجاد شده در پل قوسی ناشی از سیل در شکل ۲-۲۹ نشان داده شده است. اصولاً در مناطقی که میزان بارندگی زیاد است، سیل خطر طبیعی بزرگی برای پایداری سازه های ساخته شده از مصالح بنایی و عامل اصلی شکست پل های سنگی است. مکانیزم شکست ناشی از سیل در پلها بدین صورت است که، در طول سیل، سنگ های بزرگ، شاخه های درختان و ... همراه با آب حمل شده و در مسیر حرکت به پایه ها و بعضاً سایر قسمت های پل برخورد می کند (اگر ارتفاع سیل زیاد باشد و یا ارتفاع قوس پل کم باشد)، علاوه بر نیروی ناشی از برخورد این قطعات، می بایستی فشار هیدرودینامیکی ناشی از سرعت آب سیل را نیز اضافه کرد که بر پایه های پل وارد می آید که در نتیجه سنگ های ضعیف تر موجود در پایه ابتدا جدا شده و با جدا شدن این سنگ ها و به وجود آمدن حفره ها و سوراخهایی در پایه پل، جدا شدن قطعات دیگر پایه آسانتر بوده و در نتیجه پایداری پل در معرض خطر جدی قرار می گیرد (شکل ۲-۳۰).



شکل ۲-۲۹- شکست ایجاد شده در پل "اورانکیت" در اثر سیل [۲۶]



شکل ۲-۳۰- تخریب صورت گرفته در پایه ها که با جداشدن بخشی از قسمت های پایه همراه بوده در اثر وقوع سیل [۲۶]

۳- زلزله: در کشورهایی با خطر لرزه خیزی زیاد مثل ترکیه، بناهای قدیمی آنها در صورت عدم مراقبت و نگهداری مناسب در معرض آسیب های جدی و حتی تخریب کامل در اثر وقوع زلزله قرار دارند. خسارت ناشی از زلزله در پل های قوسی سنگی، بیشتر به صورت ترک خوردگی به ویژه در قسمت میانی قوس و جدا شدن پل از سطح جاده و زمین مشاهده می شود. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد سنگ و دیگر مصالح بنایی استفاده شده در ساخت پل های قدیمی، دارای مقاومت فشاری خوبی بوده و از مقاومت برشی یا کششی چندانی بهره مند نیستند. به همین دلیل طراحی و اجرای قوس ها نیز به گونه ای بوده که در تمام طول قوس مصالح استفاده شده در فشار قرار بگیرند، اما در طول زلزله به دلیل ماهیت این نیرو، پل تحت تغییر مکانهای جانبی قرار گرفته که همین امر نیروهای برشی را در آن ایجاد می کند که سبب وارد آمدن آسیب به پل می گردد. به عنوان مثال، پل میسیز یکی از قدیمی ترین پل های جهان که قدمت آن به حدود ۱۳۰۰ سال پیش میرسد و از پل های دوران امپراطوری روم به شمار می رود، در اثر زلزله ۱۹۹۸ آدانا دچار آسیب شد که در شکل ۲-۳۱ این آسیب نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۱- خسارت وارد آمده به پل میسیز در ترکیه در طول زلزله ۱۹۹۸ آدانا [۲۶]

تاکنون روش هایی برای افزایش مقاومت بناهای قدیمی در مقابل زلزله ارائه شده است که از آن جمله می توان به استفاده از قطعات فلزی به صورت گیره و یا میله هایی که در طول قطعات تشکیل دهنده پل قرار گرفته و به این قطعات متصل شده است که در نتیجه وظیفه یکپارچه کردن رفتار بلوک ها را برعهده دارند.

۴- عدم وجود پوشش کافی و یا داشتن زهکشی مناسب: در این صورت آب باران به درون قسمت های مختلف پل راه یافته و با شستن قسمت هایی از پل که مقاومت کمتری دارند، نظیر ملات بین بلوکها حفراتی را در پل ایجاد کرده که با گسترش این حفرات و ادامه از بین رفتن ملات بین قطعات سنگی پل، این قطعات به صورت از هم جدا درآمده که تحت اثر کمترین نیروها از پل جدا می شوند. علاوه بر این آب راه یافته به قسمت های درونی در معرض ذوب و انجماد قرار

دارد و اگر محل احداث پل در جایی باشد که تغییرات درجه حرارت زیاد باشد، این امر تشدید شده و با تغییر حجم آب میان قطعات در طول این فرآیند، سنگ ها در معرض خردشدگی قرار می گیرند (شکل ۲-۳۲).



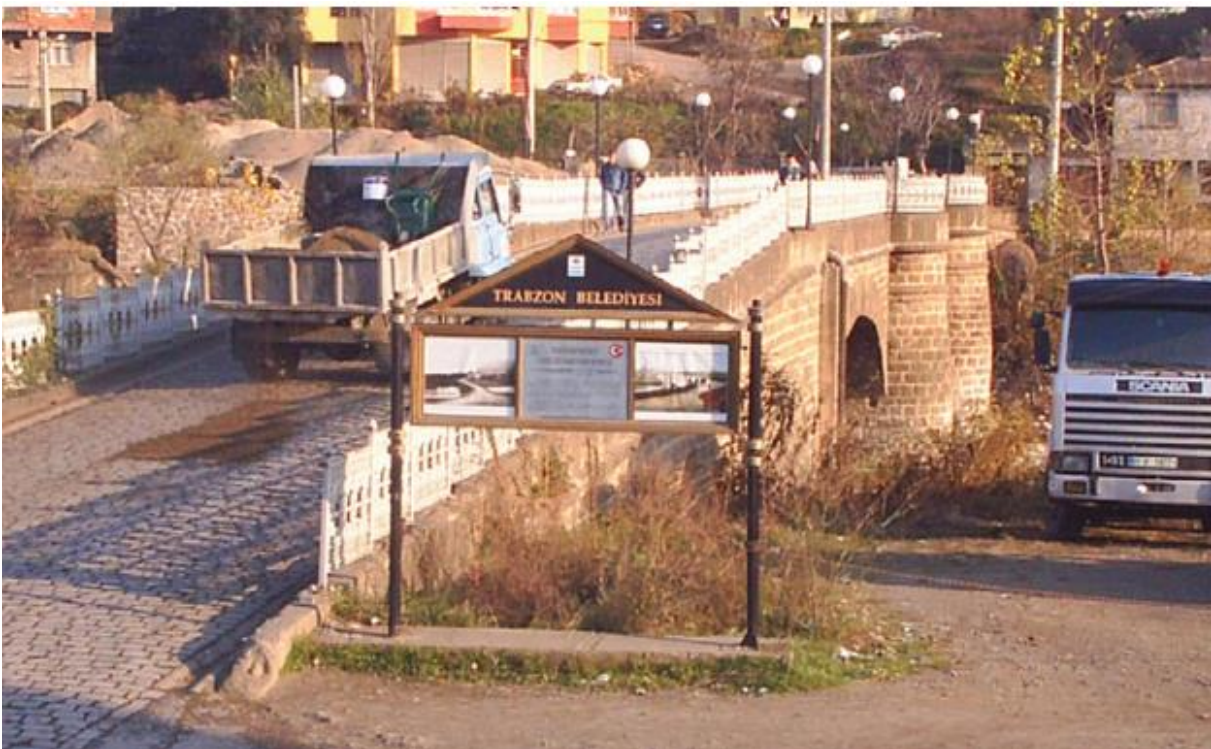
شکل ۲-۳۲- از بین رفتن پوشش روی پل در اثر آب باران و نداشتن زهکشی مناسب در پل سویزلی- ترکیه [۲۶]

۵- دوام و مقاومت کم مصالح: هرگاه مصالح استفاده شده در ساخت این پل ها از مقاومت کافی برخوردار نباشند، در مقابل این شرایط زیست محیطی عملکرد بسیار ضعیف تری خواهند داشت و در نتیجه احتمال تخریب بسیار بیشتر می شود (شکل ۲-۳۳).



شکل ۲-۳۳- تخریب صورت گرفته در پل به دلیل ضعف در مشخصات مکانیکی مصالح استفاده شده در ساخت پل [۲۶]

۶- بارگذاری بیش از حد و نامنظم: با گذشت زمان میزان و نوع بارهای وارده بر پل های قدیمی تغییر قابل توجهی داشته و شدت بارهای وارده بر پل ها امروزه به مراتب بیشتر از بارهای لحاظ شده در زمان ساخت و ساز اولیه این پل ها می باشد (شکل ۲-۳۴).



شکل ۲-۳۴- بار ترافیکی سنگین عبوری از پل بیش از مقدار باری که پل برای آن طراحی شده است [۲۶]

۷- وجود پوشش گیاهی و تخریب به دلیل عوامل زیستی: در اثر عدم توجه مناسب، تعمیر و نگهداری از پل، همچنین نبود سیستم زهکشی مناسب، رطوبت موجود در پل سبب شده تا محیط مناسبی برای رشد گیاهان فراهم شود. همانطور که در شکل ۲-۳۵ نشان داده شده است، گیاهان تقریباً در تمام سازه پل رشد کرده اند. با رشد این گیاهان، ریشه آنها نیز به قسمت های درونی پل گسترش یافته و با مواد شیمیایی تولید شده توسط آن، سبب تخریب سنگ های پل می گردد. از جمله راهکارهای مقابله با این آسیب، تمیز کردن سطح پل و از بین بردن پوشش گیاهی ایجاد شده در قسمت های مختلف آن به اضافه اجرای زهکشی مناسب در پل می باشد.



شکل ۲-۳۵- تمیز کردن پل از پوشش گیاهی ایجاد شده در سطح آن- پل اورانکیت ترکیه [۲۶]

۸- کاهش سطح بستر رودخانه ها: به دلیل ساخت و ساز در کنار رودخانه ها و یا عدم رسوب زدایی از کف رودخانه، ممکن است سطح بستر رودخانه کاهش یافته که این امر سبب شده تا در صورت جریان سیل، این جریان به دلیل کوچک بودن مجرا سرعت بیشتری یافته و اثرات مخرب بیشتری را به همراه دارد.

۲-۱۰-۲- مطالعات عددی

۲-۱۰-۲-۱- تحقیق انجام شده توسط Arteaga – Morer [۲۷]

این دو محقق در سال ۲۰۱۲ میلادی به بررسی نقش هندسه پل بر روی ظرفیت سازه ای و عملکرد آن پرداختند. در این مطالعه پل های سنگی با هندسه های مختلف با استفاده از نرم افزار ANPAF که در محیط MATLAB توسعه یافته است، ظرفیت باربری پل ها تعیین شد. بدین منظور تعداد شش پل از دوره های مختلف ایتالیا انتخاب گردید. این پل ها عبارتند از پل

ترابا همانطور که در شکل ۲-۳۶-الف نشان داده شده است شامل ۴ قوس بوده که دو قوس آن شبه نیم دایره و دو قوس دیگر از نوع نوک تیز هستند. این پل بین قرون ۱۴ و ۱۵ میلادی ساخته شده است. در شکل ۲-۳۶-ب پل تروئل که یک قوس ناقص است و در قرن ۱۷ میلادی ساخته شده، نشان داده شده است. پل سوم که در قرن ۱۵ میلادی ساخته شده است دارای ۶ قوس بوده که سه قوس اصلی در وسط و سه تای دیگر در کناره ها قرار گرفته اند (شکل ۲-۳۶-ج). تصویر سه پل دیگر نیز در شکل ۲-۳۶ مشاهده می شود.



(الف)



(ب)



(ج)



(د)



(و)



(ه)

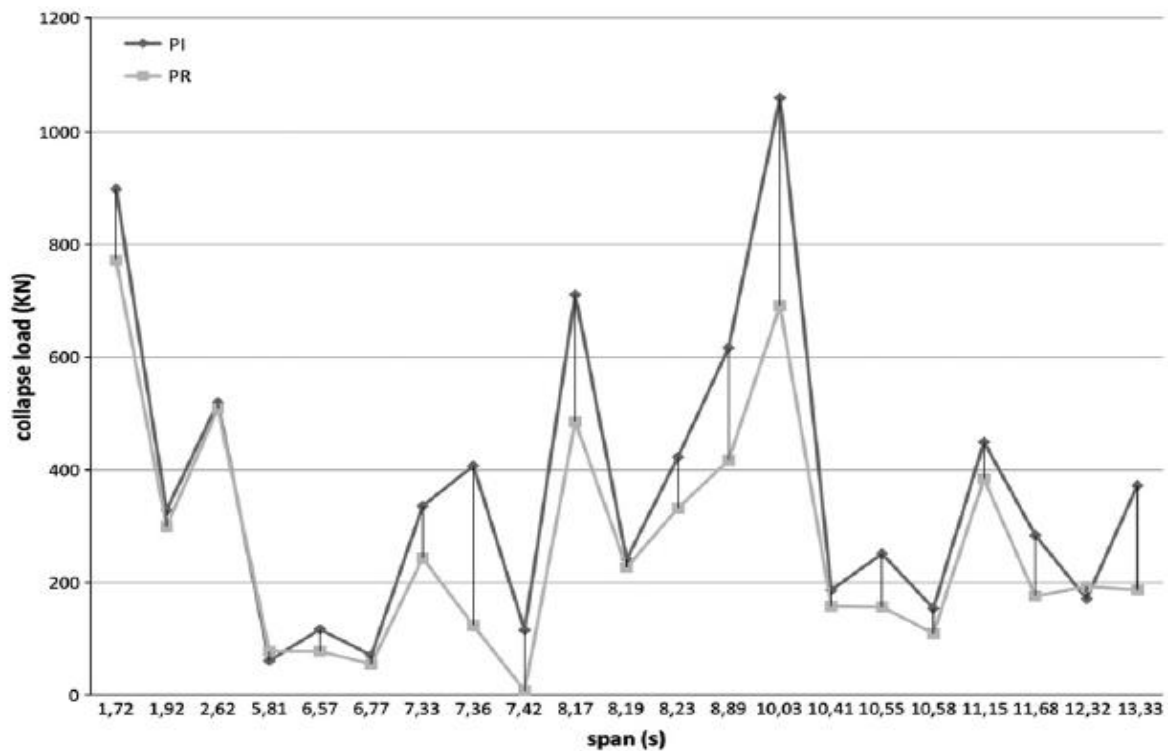
شکل ۲-۳۶- تصویر شش پل قوسی سنگی با هندسه مختلف استفاده شده جهت تخمین ظرفیت باربری پل [۲۷]

بعد از برآورد دقیق مشخصات هندسی پلهای مورد بررسی، این پلها بر اساس ابعاد و اندازه های استخراج شده در محیط نرم افزار ANPAF مدل و سپس تحلیل شده تا بار نهایی احتمالی پل ها مشخص گردد. مشخصات قوس های مورد مطالعه در نرم افزار شامل طول دهانه، ارتفاع، ضخامت قوس و نسبت های حاصله از این پارامترها در جدول ۲-۱ آورده شده است (ابعاد این جدول برحسب متر هستند).

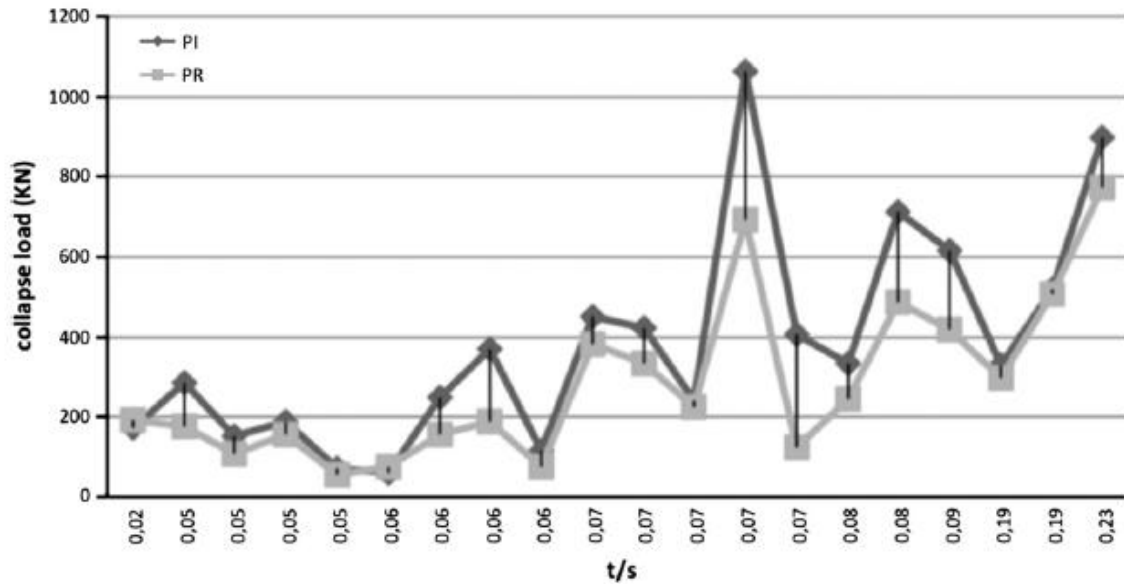
جدول ۲-۱- مشخصات هندسی قوس های مدل شده [۲۷]

	Span (s)	Rise (r)	Thickness			Thickness
			(t)	t/s	r/s	
Arch 1	1.72	0.93	0.40	0.23	0.54	0.39
Arch 2	1.92	0.92	0.36	0.19	0.48	0.36
Arch 3	2.62	2.06	0.51	0.19	0.79	0.49
Arch 4	5.81	3.56	0.32	0.06	0.61	0.45
Arch 5	6.57	3.43	0.42	0.06	0.52	0.47
Arch 6	6.77	4.07	0.37	0.05	0.60	0.47
Arch 7	7.33	3.34	0.61	0.08	0.46	0.63
Arch 8	7.36	4.06	0.55	0.07	0.55	0.54/0.56
Arch 9	7.42	3.74	0.40	0.05	0.50	0.48
Arch 10	8.17	4.04	0.69	0.08	0.49	0.67
Arch 11	8.19	4.85	0.56	0.07	0.59	0.57
Arch 12	8.23	3.40	0.54	0.07	0.41	0.57
Arch 13	8.89	4.26	0.78	0.09	0.48	0.70
Arch 14	10.03	4.53	0.73	0.07	0.45	0.73
Arch 15	10.41	4.28	0.53	0.05	0.41	0.55
Arch 16	10.55	4.31	0.63	0.06	0.41	0.64
Arch 17	10.58	4.71	0.51	0.05	0.45	0.55
Arch 18	11.15	4.64	0.73	0.07	0.42	0.72
Arch 19	11.68	4.92	0.53	0.05	0.42	0.57
Arch 20	12.32	2.06	0.30	0.02	0.17	0.59
Arch 21	13.33	6.48	0.81	0.06	0.49	0.79/0.83

نتایج تحلیل این نرم افزار، مقادیر بار فروپاشی (P) را برای قوس های مختلف با طول دهانه، نسبت ضخامت به طول دهانه قوس صورت نموداری در شکل های ۲-۳۷ و ۲-۳۸ نشان داده شده است. PI و PR در این نمودارها معرف مقادیر بار نظیر شکست قوس در دو حالت به ترتیب مدل با هندسه ایده آل و هندسه واقعی می باشد.



شکل ۲-۳۷- رابطه نظیر بار فروپاشی قوس - دهانه قوس



شکل ۲-۳۸- رابطه نظیر بار فورپاشی قوس - نسبت ضخامت به طول دهانه قوس

با توجه به دو شکل بالا علاوه بر اینکه رابطه بار نظیر فروریزی قوس و طول دهانه و ضخامت قوس مشخص می شود، نقش طول دهانه و نسبت ضخامت به دهانه بر روی تفاوت مقادیر بارهای محاسبه شده از مدل های ساخته شده بر اساس هندسه واقعی و ایده آل مشخص می شود.

۲-۱۰-۳- مطالعات نرم افزاری (اجزاء محدود)

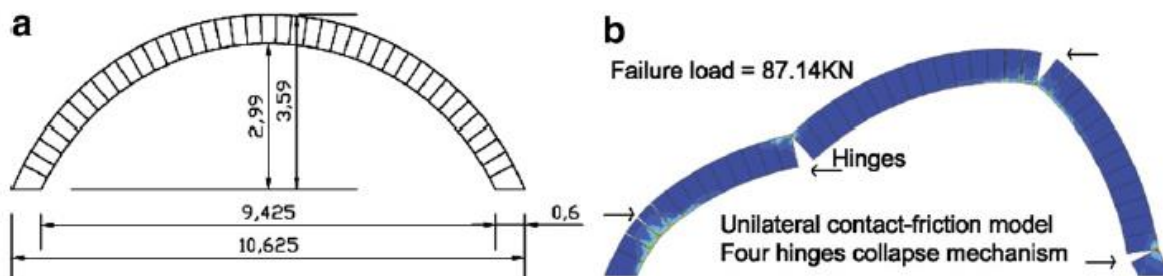
۲-۱۰-۳-۱- مطالعات Drosopolous و همکاران [۲۵]

در این تحقیق به ارائه روشی برای تعیین بار حدى و مود شکست در پلهای قوسی سنگی مقاوم سازی شده با FRP، با استفاده از مدل سازی کامپیوتری پرداخته شده است. اساس این تحقیق ارائه مدل جدیدی برای تماس بین وصل مشترک ورق FRP و بلوک های سنگ، به صورت اصطکاکی بوده که قابلیت مدل کردن ترک را نیز دارد. با تقویت پل به وسیله نوارهای FRP مودهای شکست سازه مقاوم سازی شده شامل: لغزش بلوک های سنگ، یا خرد شدن آنها و همچنین جدا شدن نوارهای تقویتی FRP می باشد.

بدین منظور پل قوسی سنگی با مشخصات نشان داده شده در شکل ۲-۳۹ به روش اجزا محدود مدل شده و میزان حداکثر ظرفیت باربری قوس و همچنین نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در آن تعیین شده است. جهت مدل کردن رفتار مصالح سنگی از مدل دراگر-پراگر استفاده شده است. مشخصات مصالح سنگی و لایه های FRP استفاده شده جهت تقویت قوس در جدول ۲-۲ آورده شده است.

جدول ۲-۲- مشخصات مصالح سنگی و FRP استفاده شده در پل مطالعه شده [۲۵]

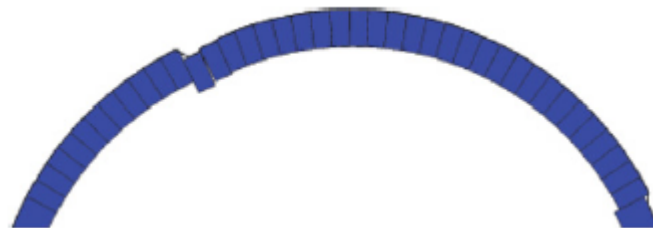
سنگ Masonry		
Young's modulus	مدول یانگ	5 GPa
Poisson's ratio	ضریب پواسون	0.3
Density	چرم مخصوص	2200 Kg/m ³
Compressive yield stress	مقاومت فشاری تسلیم	10 MPa
Width	عرض	1 m
FRP Reinforcement لایه FRP		
Young's modulus		50 GPa
Poisson's ratio		0.3
Thickness	ضخامت لایه	1 mm
Tensile yield stress	مقاومت کششی	5 GPa
Width	عرض	0.4 m



شکل ۲-۳۹- مشخصات هندسی قوس و مکانیزم شکست ایجاد شده در قوس در حالت بدون مقاوم سازی

همانطور که در شکل بالا مشاهده می شود، در حالت بدون مقاوم سازی حداکثر ظرفیت باربری قوس ۸۷/۱۴ کیلونیوتن بوده و مکانیزم شکست با تشکیل ۴ مفصل در قوس صورت می گیرد. با تقویت قوس توسط نوارهای FRP بار نظیر شکست قوس به

مقدار ۵۸۶/۹ کیلونیوتن یعنی تقریباً ۶ برابر حالت قوس تقویت نشده می رسد. علت این امر این است که با شروع لغزش در بلوک های تشکیل دهنده قوس، تنش در FRP در سطحی از مدل که قرار گرفته به حد تسلیم رسیده، به ویژه در نقاطی که بار وارد می شود، درحالیکه هیچ شکست فشاری در بلوک های سنگی رخ نمی دهد.

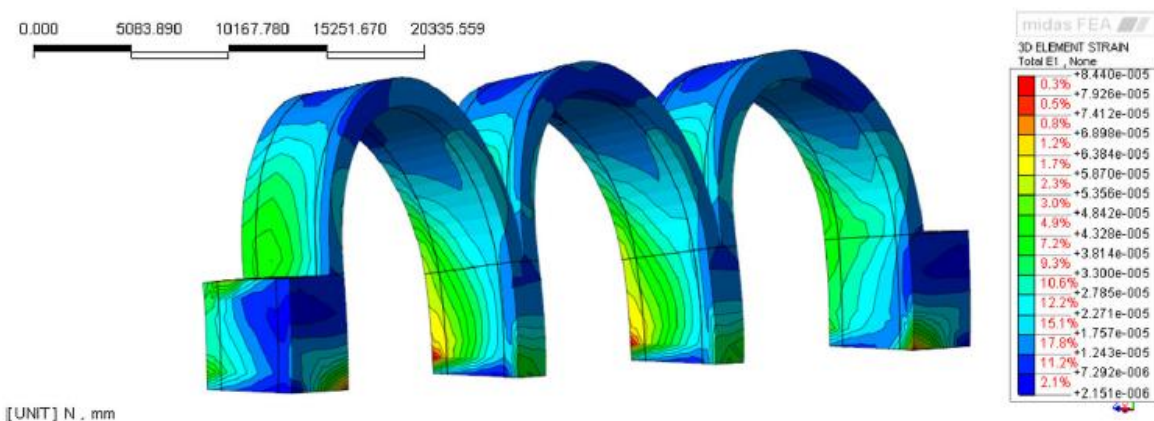


شکل ۲-۴۰- حالت شکست در قوس تقویت شده با ورق FRP قرار گرفته بر روی کل سطح قوس خارجی

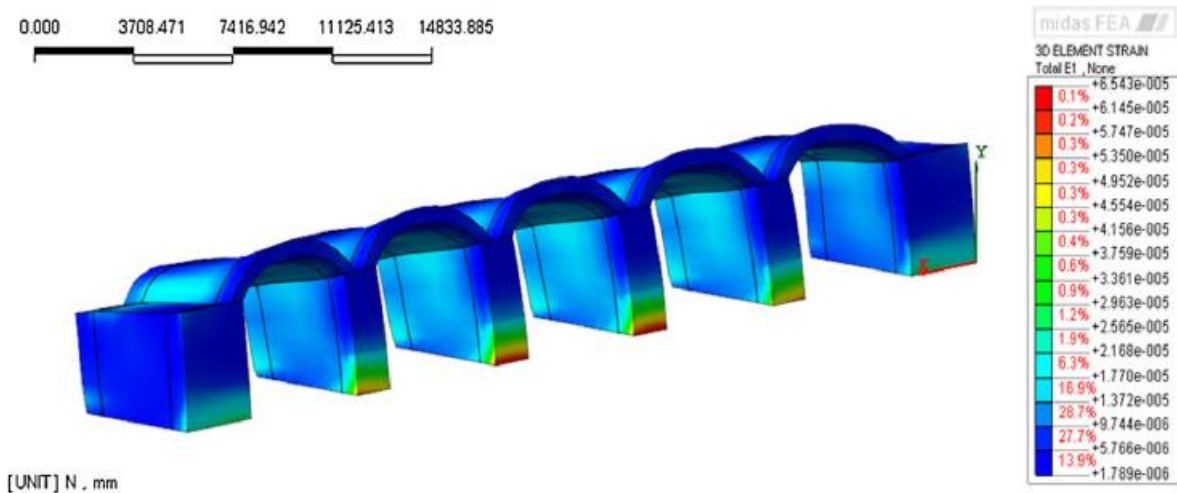
همچنین در این تحقیق مقادیر بار شکست نظیر قوس برای حالت های مختلف تقویت توسط ورق های FRP (اینکه فقط در سطح قوس خارجی ورق های FRP استفاده شده و یا در هر دو سطح داخلی و خارجی قوس) تعیین شده است. بر این اساس اگر فقط سطح داخلی قوس تقویت شود بار شکست معادل ۴۵۶/۹ کیلونیوتن است. نحوه اتصال ورق های FRP به قوس هم بر روی نتایج بدست آمده اثر گذار است.

۲-۱۰-۳-۲- تحقیقات Zampieri و همکاران [۲۸]

در این تحقیق که نتایج آن در سال ۲۰۱۵ میلادی ارائه شد، محققان با استفاده از مدل سازی در محیط نرم افزار MidasFEA به مطالعه و ارزیابی لرزه ای پل های قوسی سنگی چند دهانه مقاوم سازی شده پرداختند. در این مطالعه نقش عوامل هندسی نظیر طول دهانه قوس (L)، نسبت ارتفاع به طول دهانه قوس (f/L) و H/B بررسی شده، که H و B به ترتیب طول و عرض پایه های نگه دارنده قوس ها هستند. ملاک بررسی مقادیر تنش ها و چگونگی توزیع کرنش و جابجایی ها در سطح پل ها بوده است. در شکل های ۲-۴۱ و ۲-۴۲ نتایج توزیع کرنش در دو نمونه از پل های مورد بررسی نشان داده شده است.



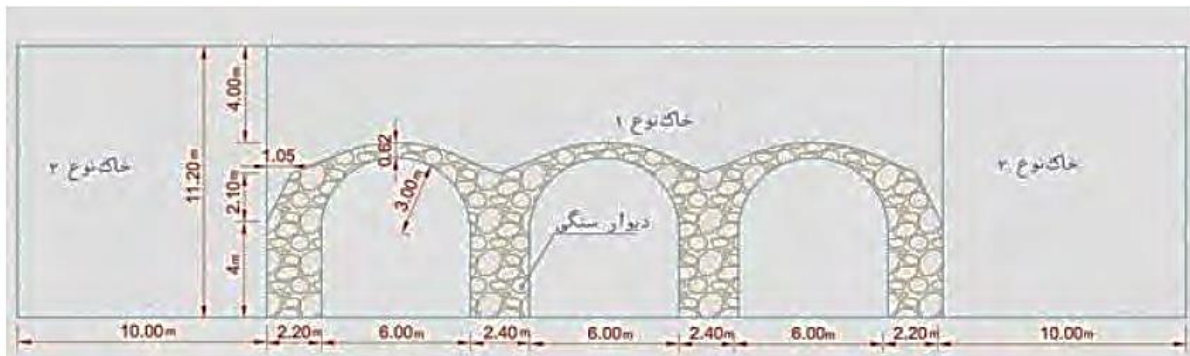
شکل ۲-۴۱- وضعیت کرنش در سطح پل قوسی سه دهانه به طول دهانه ۱۸ متر و نسبت $f/L=0.5$ و $H/B=2$



شکل ۲-۴۲- وضعیت کرنش در سطح پل قوسی پنج دهانه به طول دهانه ۶ متر و نسبت $f/L=0.2$ و $H/B=2$

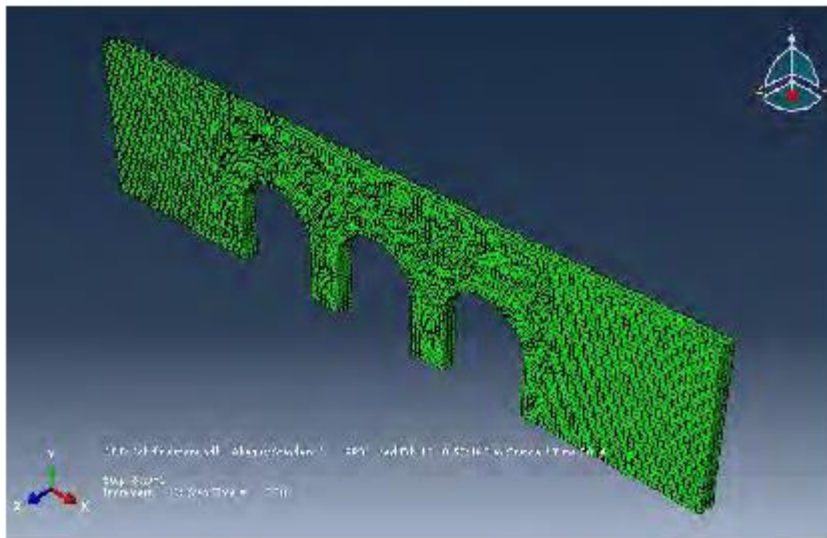
۲-۱۰-۳- مطالعه انجام شده توسط کیوان نیا-اخیسی [۳۰]

در این مطالعه پل قوسی سنگی سه دهانه در منطقه درودگران شهرستان ملایر واقع شده است، با استفاده از مدل سازی عددی در نرم افزار ABAQUS و با اعمال شرایط نزدیک به واقعیت بر مدل، به روش اجزا محدود، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در شکل ۲-۴۳ نمای روبروی پل نشان داده شده است.



شکل ۲-۴۳- نقشه نمای روبروی پل قوسی سنگی درودگران [۳۰]

مشخصات اجرایی پل بدین صورت بوده که پل از نوع قوسی طاقی (نیم دایره کامل) و از جنس مصالح بنایی سنگ و ملات ماسه سیمان می باشد. عرض پل در راستای Z (عمود بر صفحه) ۲۳ متر بوده که در این مطالعه برای جلوگیری از وجود تعداد زیاد المانها، عرض مدل در این امتداد یک متر لحاظ شده است. به منظور مدل سازی دقیق تر مصالح بنایی استفاده شده نمونه هایی در آزمایشگاه ساخته شده و مشخصات بدست آمده برای این نمونه ها، وارد نرم افزار شده است.



شکل ۳: نمای مش بندی مدل پل درودگران در نرم افزار

شکل ۲-۴۴- نمایشی از مدل ساخته شده از پل درودگران در نرم افزار ABAQUS و مش بندی مدل [۳۰]

مدل مزبور تحت بار ثقلی و شتاب وارده بر اساس شتاب نگاشت های زلزله های السنترو و طیس قرار گرفته و تحلیل استاتیکی و دینامیکی شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از این مطالعه پل مزبور بسیار ترد بوده و از شکل پذیری کافی برخوردار نمی باشد و لذا بدیهی است که پل تحت اثر بارهای توام ثقلی و جانبی دچار آسیب شود بطوریکه پارامتر خرابی پل برای زلزله طیس حدود ۷۵ درصد بدست آمد.

۲-۱۰-۳-۴- مطالعه افراز حبیبی - احمدی [۳۱]

اساس این مطالعه بر روی ارائه مدل رفتاری مناسب برای مصالح بنایی استفاده شده در پل های قوسی سنگی می باشد. در این مطالعه از مدل های اصطکاکی خمیری برای تعریف مصالح در نرم افزار ABAQUS بکار رفته است. علاوه بر اینکه رفتار غیر خطی مصالح لحاظ شده است، اتصالات بین بلوک ها نیز با عملکردی غیرخطی مدل شده اند. این بررسی با استفاده از مدل سازی پل پرستوود توسط ۱۰ سنگ طاق مجزا در نرم افزار ABAQUS و به روش اجزا محدود انجام گردید.

در این مطالعه با تعیین بار نهایی و تغییر مکان قائم پل پرستوود برای مدل هایی در محیط نرم افزار ABAQUS که از مدل های رفتاری مختلفی برای تعریف مصالح در نرم افزار استفاده شده بود (مدل های الاستیک، موهر-کولمب، دراگر-پراگر و آسیب دیده پلاستیک) دقت این مدل ها، مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۱۰-۳-۵- پایان نامه مهندس تقی زاده [۵۱]

در این پایان نامه که در دانشگاه تفرش تهیه گردیده، سعی شده است با وارد کردن انواع بارها از جمله بارهای محوری و بار عمودی (بارهای قطار) ابتدا تنش های وارده به یک پل از محور تهران- تبریز بررسی شده است و سپس به منظور تعمیر و بهسازی سازه پل از الیاف FRP استفاده شده است که باعث کاهش تنش های وارده به سازه شده است. نهایتاً تنش های وارده را با یکدیگر مقایسه و بررسی کرده اند. در جدول ۲-۳ نتایج بارگذاری های وارده بر پل قابل مشاهده است.

جدول ۲-۳- نتایج انواع بارگذاری اعمالی در پل مورد مطالعه مهندس تقی زاده [۵۱]

ردیف	بار مرده			بارگذاری سازه تقویت شده با مدل IML (لطف بار زنده)			بارگذاری سازه تقویت شده با مدل IML (لطف بار زنده)			بارگذاری سازه تقویت شده با مدل IML (لطف بار زنده)			جمع حداکثر لحظات ششی و جابجایی		
	UF	SFF	SMax	UF	SFF	SMax	UF	SFF	SMax	UF	SFF	SMax	UF	SFF	SMax
	m	Ton/m ²	Ton/m ²	m	Ton/m ²	Ton/m ²	m	Ton/m ²	Ton/m ²	m	Ton/m ²	Ton/m ²	m	Ton/m ²	Ton/m ²
۷۱	۰.۰۰۶	۸.۵۴۱	۳.۱۲۶	۰.۰۰۲۲۱	۱۱.۵۱۷	۲.۵۷۱	۰.۰۰۰۱۰	۱۸.۴۴۷	۱۹.۵۹۸	۰.۰۰۰۸۶	۲.۱۸۷	۰.۵۱۸	۰.۰۰۰۸۵۹	۹.۷۹۶	۲۲.۷۲۲
۷۲	۰.۰۱۴	۱.۰۲۴	۲.۰۲۶	۰.۰۰۶۶۹	۱.۵۸۴	۹.۷۶۱	۰.۰۰۰۲۲	۱.۳۴۲	۹.۷۶۲	۰.۰۰۱۸۲	۰.۰۰۲۷۰	۳.۳۱۷	۰.۰۰۲۰۹۱	۰.۳۰۸	۱۱.۸۰۷
۵۱	۰.۰۰۵۷۸	۱۲۰.۱۹۶	۰.۲۲۶	۰.۰۰۲۹۳	۲۳.۲۱۰	۴.۳۱۳	۰.۰۰۰۶۴	۱۱.۴۴۷	۱.۳۲۱	۰.۰۰۱۱۵	۱.۳۲۵	۱.۳۲۷	۰.۰۰۸۷۱	۱۲۱.۸۲۱	۱.۸۵۲
۵۲	۰.۰۲۴	۴۳.۵۴۹	۱.۸۸۷	۰.۰۰۵۵۶	۱.۷۶۴	۶.۳۷۱	۰.۰۰۰۶۷۵	۱۸.۴۴۰	۹.۹۰۴	۰.۰۰۱۵۴	۱۲.۸۰۰	۰.۳۲۶	۰.۰۰۳۰۵۳	۴۱.۷۸۵	۱۱.۷۹۱
۵۳	۰.۰۲۷	۴۳.۲۱۲	۰.۶۸۶	۰.۰۰۱۶۸	۱۳.۷۲۷	۳.۳۹۱	۰.۰۰۱۲۳۰	۱.۳۴۲	۹.۹۰۱	۰.۰۰۰۵۲	۱.۸۷۵	۲.۳۸۷	۰.۰۰۳۶۰	۳۳.۵۸۰	۱۰.۵۸۸
۵۴	۰.۰۲۴	۶۱.۱۳۰	۰.۴۵۵	۰.۰۰۱۰۱	۱۷.۲۴۰	۲.۸۶۰	۰.۰۰۰۸۲۲	۱۲.۸۰۰	۶.۳۲۱	۰.۰۰۳۸۱	۱.۵۴۲	۲.۱۷۴	۰.۰۰۳۲۱۲	۴۳.۵۴۲	۶.۶۰۴
۵۵	۰.۰۰۵	۱۶۶.۲۴۶	۰.۵۳۲	۰.۰۰۰۹۷	۵.۹۴۱	۲.۰۰۴	۰.۰۰۰۹۰	۱۸.۱۱۷	۳.۲۲۰	۰.۰۰۲۹۱	۲۱.۹۱۴	۲.۳۲۵	۰.۰۰۲۷۸	۱۲۲.۱۸۷	۳.۹۰۴
۷۴	۰.۰۱۲	۱.۹۷۵	۲۰.۴۵۷	۰.۰۰۱۸۴	۱.۴۶۴	۰.۹۱۳	۰.۰۰۰۱۹	۰.۳۵۸	۲.۹۵۳	۰.۰۰۰۶۸۱	۰.۰۰۳۸۰	۱۲.۵۴۰	۰.۰۰۱۸۶۵	۲.۳۲۲	۲۰.۹۱۴
۷۵	۰.۰۰۶	۰.۰۱۲	۲.۱۹۱	۰.۰۰۰۹۹	۲.۳۸۵	۱.۳۶۹	۰.۰۰۰۸۳	۱.۳۲۱	۲.۳۵۶	۰.۰۰۳۲۹	۱.۰۸۱	۱۷.۳۱۲	۰.۰۰۰۸۴۴	۱.۰۹۳	۱۹.۴۰۳
۷۵	۰.۰۰۶	۰.۰۴۰	۱.۰۱۰	۰.۰۰۰۸۰	۱.۷۴۹	۱.۲۸۷	۰.۰۰۰۶۱	۰.۱۵۳	۲.۵۲۸	۰.۰۰۰۳۷	۱.۵۸۳	۶.۳۶۱	۰.۰۰۰۶۵۴	۱.۱۸۱	۲.۳۷۱
۷۶	۰.۰۱۲	۰.۳۸۷	۱۷.۸۵۲	۰.۰۰۱۵۵	۱.۸۰۷	۱.۳۶۷	۰.۰۰۰۷۸	۰.۱۵۵	۰.۰۱۳	۰.۰۰۰۸۲	۲.۳۲۶	۹.۱۳۷	۰.۰۰۱۲۲۶	۲.۳۲۲	۲۵.۴۰۵
۵۶	۰.۰۰۵	۱۷۸.۴۸۷	۰.۵۲۰	۰.۰۰۰۸۹	۲.۴۴۲	۰.۳۲۵	۰.۰۰۰۵۴	۲.۵۵۲	۰.۰۰۹۵	۰.۰۰۰۶۱	۷.۳۶۲	۰.۵۷۲	۰.۰۰۰۵۵۳	۱۸۰.۹۳۰	۰.۴۵۳
۵۷	۰.۰۲۲	۶۰.۹۴۹	۰.۵۵۷	۰.۰۰۱۸۴	۱.۴۹۹	۱.۴۴۲	۰.۰۰۰۸۲	۲.۳۲۵	۰.۱۴۰	۰.۰۰۰۲۴	۲.۵۶۸	۱.۴۲۱	۰.۰۰۲۲۲۵	۶۲.۳۲۹	۱.۸۸۱
۵۸	۰.۰۲۷	۴۴.۴۱۲	۲.۰۰۷	۰.۰۰۰۸۴	۲.۷۶۲	۰.۲۸۱	۰.۰۰۰۶۸	۲.۷۶۶	۰.۵۱۴	۰.۰۰۱۲۲	۱.۶۸۷	۳.۳۲۷	۰.۰۰۲۷۱۲	۳۲.۸۰۵	۵.۷۲۲
۵۹	۰.۰۲۵	۳۶.۷۱۰	۰.۶۷۳	۰.۰۰۰۱۳	۶.۵۴۲	۰.۱۴۹	۰.۰۰۰۴۴	۲.۹۱۵	۰.۰۰۶۴	۰.۰۰۲۰۶	۲.۳۱۵	۴.۵۲۱	۰.۰۰۲۷۲۱	۳۳.۴۱۵	۲.۱۹۲
۶۰	۰.۰۰۶	۱۸۸.۴۹۰	۰.۶۹۱	۰.۰۰۰۴۵	۶.۱۴۴	۰.۳۰۵	۰.۰۰۰۰۷	۴.۷۹۱	۰.۰۰۷۸	۰.۰۰۰۷۲	۴.۰۴۹	۰.۱۷۲	۰.۰۰۰۶۲۸	۱۹۱.۴۲۹	۰.۲۸۱
۷۷	۰.۰۱۵	۱.۰۶۰	۸.۴۰۴	۰.۰۰۰۶۲	۰.۱۴۱	۰.۹۴۴	۰.۰۰۰۱۱	۰.۰۰۲۶	۰.۳۶۱	۰.۰۰۱۵۲	۰.۱۴۹	۲.۰۰۴	۰.۰۰۱۵۲۱	۰.۵۲۱	۱۶.۶۰۸
۷۸	۰.۰۰۷	۰.۲۴۶	۱.۴۴۲	۰.۰۰۰۴۵	۰.۴۸۲	۰.۱۷۴	۰.۰۰۰۰۵	۰.۳۰۷	۰.۰۰۲۵	۰.۰۰۰۵۴	۰.۲۹۰	۱.۶۵۱	۰.۰۰۰۷۸۲	۰.۴۵۵	۲.۸۱۲

۲-۱۰-۴- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱۰-۴-۱- مطالعات Modena و همکاران [۲۴]

در این مطالعه Modena و همکاران به بررسی موردی پل "ساندرو گالو" واقع در شهر ونیز ایتالیا و انواع روش های عملی تعمیر و مقاوم سازی پرداختند. این پل که ساخت آن در قرن ۱۹ میلادی شروع و در اوایل قرن بیستم تکمیل گردید، از یک قوس سنگی به ضخامت ۳۶ سانتیمتر (در سه لایه) در قسمت مرکزی و ۵۵ سانتیمتر (۴ لایه) در گوشه ها تشکیل شده است (شکل ۲-۴۵). این پل برای عبور خودرو و عابر پیاده استفاده می شود.



شکل ۲-۴۵- نمایی از پل سندرو گالو در شهر ونیز ایتالیا [۲۴]

جهت بررسی عملکرد پل از آزمون های مخرب و نسبتاً مخرب استفاده شده که با استفاده از ایجاد سه نمونه و سه آزمون منفرد و یک آزمون دوگانه جک تخت، در سازه پل قوسی سنگی، انجام گرفته است. بر اساس نمونه گیری های انجام شده در نقاط مختلف قوس مشخص شد که ضخامت قوس در قسمت مرکزی ۳۷ سانتیمتر و در فواصل ۱/۲۷ و ۰/۵۳ متر از پایه به ترتیب ۴۷ و ۵۵ سانتیمتر می باشد. همچنین بر اساس آزمون جک تخت انجام شده در نقاط مختلف قوس مشخص گردید تنش تقریباً یکنواختی در قوس وجود دارد. آزمون جک تخت در نقاطی از قوس به فواصل ۱، ۱/۷ و ۱/۹ متر از پایه پل انجام و مقادیر تنش قرائت شده به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۲۴ و ۰/۲۵ مگاپاسکال بود، که بسیار کمتر از مقاومت فشاری مصالح استفاده شده در ساخت پل یعنی ۲ مگاپاسکال است.

به منظور حفاظت پل و همچنین بهسازی و مقاوم سازی آن جهت تحمل بارهای جدیدی که بر آن امروزه وارد می آید، روش های زیر استفاده شده است:

- ۱- ضخامت بخش مرکزی قوس را عمیق تر کرده، بدین منظور به بخش مرکزی قوس که دارای سه لایه سنگ بود، یک لایه سنگ دسگر اضافه کرده و تعداد لایه های سنگ در قسمت مرکزی را به ۴ لایه رساندند. برای تضمین انتقال برشی میان سه لایه قدیمی قوس و لایه جدید اضافه شده، لایه جدید با استفاده از رولپلاک های فلزی و چسب اپوکسی بین دو قسمت استفاده شده است (شکل ۲-۴۶).



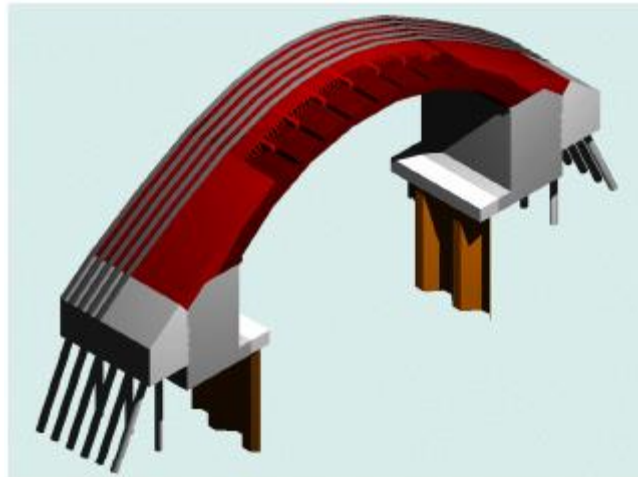
a)



b)

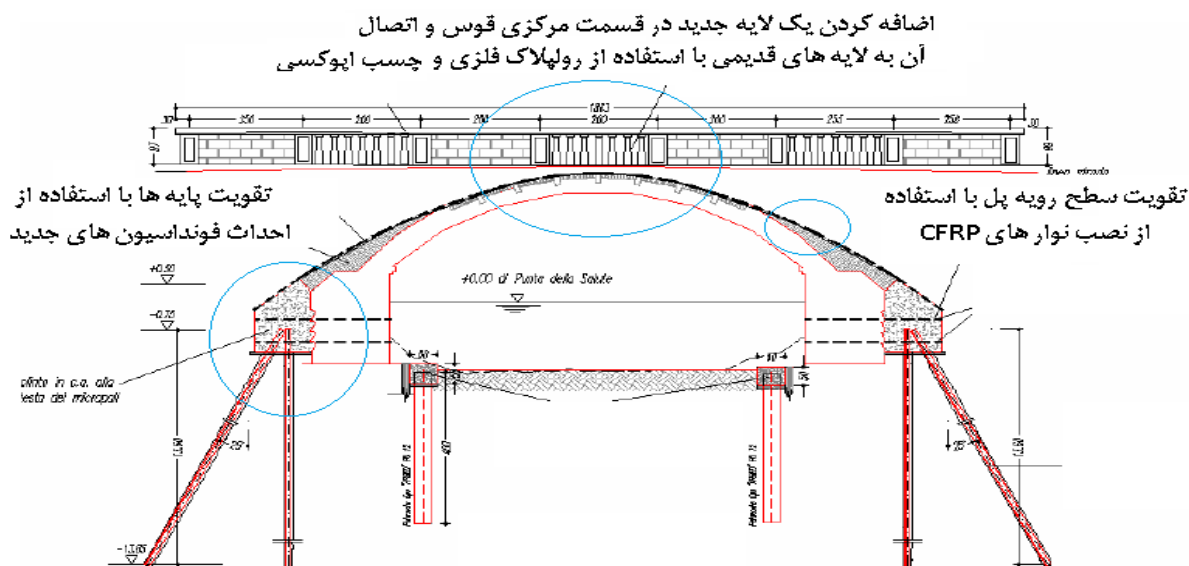
شکل ۲-۴۶- پل قوسی سنگی پس از خارج کردن خاکریز روی پل [۲۴]

۲- در تراز پایه های پل، یک فونداسیون جدید بر روی یک سری شمع های کوتاه احداث شده تا توانایی پل را جهت تحمل بارهای ترافیکی جدید افزایش دهد. همچنین فونداسیون جدید دیگری ساخته شده از بتن مسلح در لبه های خارج پایه های فعلی (به سمت کانال) قرار گرفته است. این فونداسیون توانایی پل را در تحمل نیروهای افقی و عمودی منتقل شده به پایه با استفاده از عملکرد اصطکاکی جانبی، افزایش می دهد. بدین منظور استقرار آن به صورت دندانه ای است (شکل ۲-۴۷).



شکل ۲-۴۷- تقویت پایه های پل با استفاده از احداث فونداسیون های جدید [۲۴]

۳- پس از برداشتن خاکریز روی پل و آماده سازی سطح رویه قوس (شامل جمع کردن سنگ های آسیب دیده رویه و جایگزین کردن آنها با بلوک های سالم) فضای بین سنگها توسط ملات آهک پر کرده اند. پس از صاف کردن سطح رویه، لایه های CFRP را با استفاده از چسب چسبانده سپس بر روی قوس عملیات خاکریزی انجام شده تا به سطح اولیه جاده برسد. شکل شماتیک پل در حالت بعد از مقاوم سازی های انجام شده در شکل ۲-۴۸ نشان داده شده است.



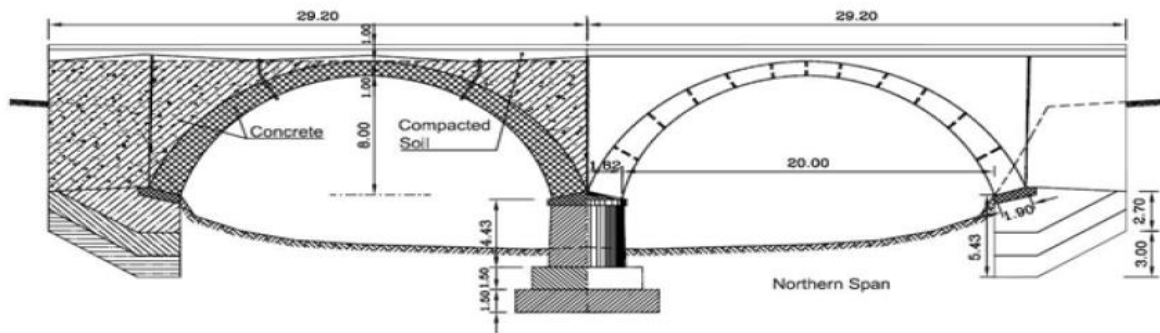
شکل ۲-۴۸- مقطع عرضی از پل سندروگالو و عملیات مقاوم سازی انجام شده بر روی آن [۲۴]

۲-۱۰-۵- مطالعات اجزاء محدود و آزمایشگاهی

۲-۱۰-۵-۱- مطالعه معرفت و همکاران بر روی یک پل قوسی بتنی غیر مسلح [۲۹]

اساس این مطالعه به منظور بررسی رفتار پل قوسی بتنی غیرمسلح ۲۳ کیلومتر راه آهن قدیم تهران-قم بوده است، که ابتدا با بارگذاری محدود انجام شده بر روی پل، پارامترهای مهمی نظیر سختی اولیه، مقاومت تسلیم، الگوی ترک خوردگی مشخص شده و از آنجاییکه به دلیل محدودیت های میدانی امکان بارگذاری پل تا حد نهایی فراهم نشد، بر اساس داده های بدست آمده از بارگذاری محدود پل و استفاده از مدل سازی به روش اجزا محدود، پاسخ غیرخطی پل تا بار نهایی پیش بینی گردید.

پل مورد مطالعه شامل دو دهانه ۲۰ متری با طول عمری حدود ۷۰ سال است (شکل ۲-۴۹). از مطالعات میدانی انجام شده بر روی پل مشخص شد که ترک های اولیه ای به ضخامت ۱ تا ۳ سانتیمتر در کلید هر دو قوس و دو طرف پاتاق میانی قوس، به صورت عمیق وجود دارد که پهنای آنها از سطح به عمق کاهش یافته و در نیمه بالایی ضخامت قوس، بسته به نظر می رسند. علاوه بر این آثار تخریب دیگری چون خوردگی در سازه دیده نشد. در جدول ۲-۴ مشخصات هندسی پل و در جدول ۲-۵ مشخصات بتن تشکیل دهنده با توجه به نتایج آزمایش کرگیری انجام شده بر روی پل آورده شده است.



شکل ۲-۴۹- نمای پل قوسی کیلومتر ۲۳ راه آهن تهران-قم [۲۹]

جدول ۲-۴- مشخصات هندسی پل [۲۹]

موقعیت پل	تعداد دهانه	طول دهانه (متر)	شکل قوس	ضخامت کلید (متر)	ضخامت پاتاق (متر)	عرض قوس (متر)	ارتفاع پل (متر)	ضخامت دیوار پیشانی (متر)
کیلومتر ۲۳	۲	۲۰	قسمتی از دایره	۱	۱/۹	۳/۹	۱۲	۱

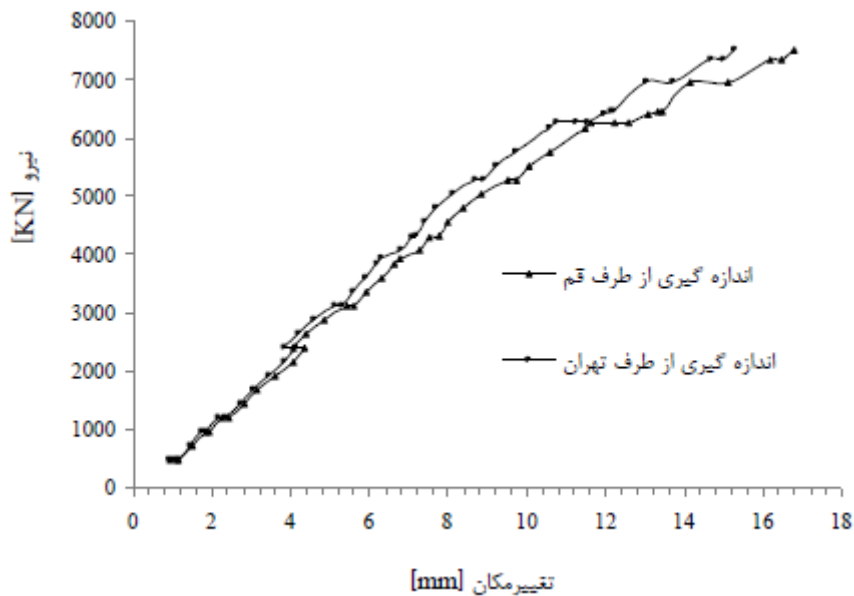
جدول ۲-۵- مشخصات بتن بدست آمده از آزمایش انجام شده بر روی پل

عنوان	مقاومت فشاری بتن (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	وزن مخصوص (kg/m^3)
بتن پرکننده	۱۷/۶	۲۰/۲	۲۳۰۰
قوس	۱۷/۳	۱۷	۲۲۸۰
پایه	۲۷/۹	۳۷/۳	۲۳۵۰

همانطور که در شکل ۲-۵۰ نشان داده شده است بارگذاری فقط بر روی یکی از دهانه های پل (دهانه سمت تهران پل) و با استفاده از قرار دادن وزنه های ۴۰ کیلونیوتنی انجام شده است. افزایش روند بارگذاری وارده بر پل به صورت تدریجی بوده و در هرگام آزمایش، افزایش باری به میزان ۲۴۰ کیلونیوتن صورت می پذیرد. در طول روند آزمایش تغییر مکان کلید قوس و بازشدگی ترک کلید ثبت شده است. شکل ۲-۴۹ نمودار تغییر مکان عمودی کلید قوس در طول بارگذاری را نشان می دهد. در این آزمایش تا بار ۴۰۰۰ کیلونیوتن هیچگونه ترک جدیدی در سازه مشاهده نشد، اما از این مرحله به بعد یکسری ترک های مویین در حوالی ترک های اولیه پاتاق ها، پدیدار شده و ترک های اولیه نیز عمیق تر شدند.

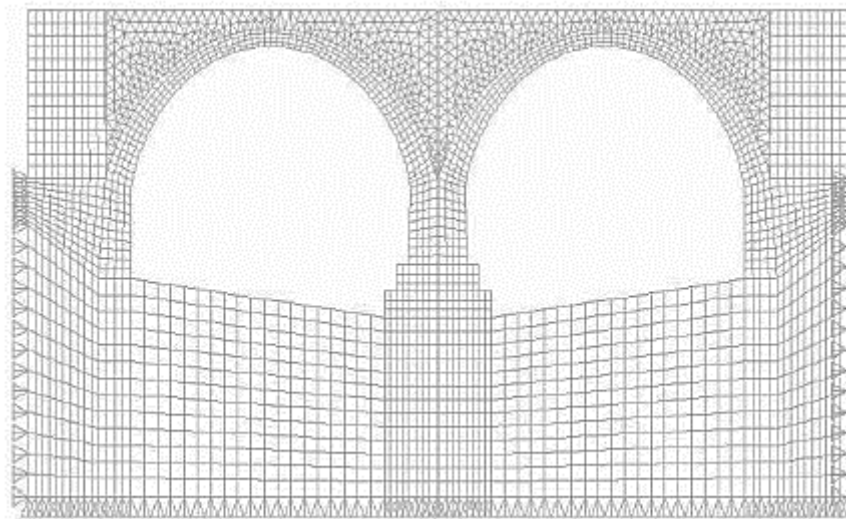


شکل ۲-۵۰- نحوه انجام بارگذاری بر روی یکی از دهانه های پل کیلومتر ۲۳ [۲۹]



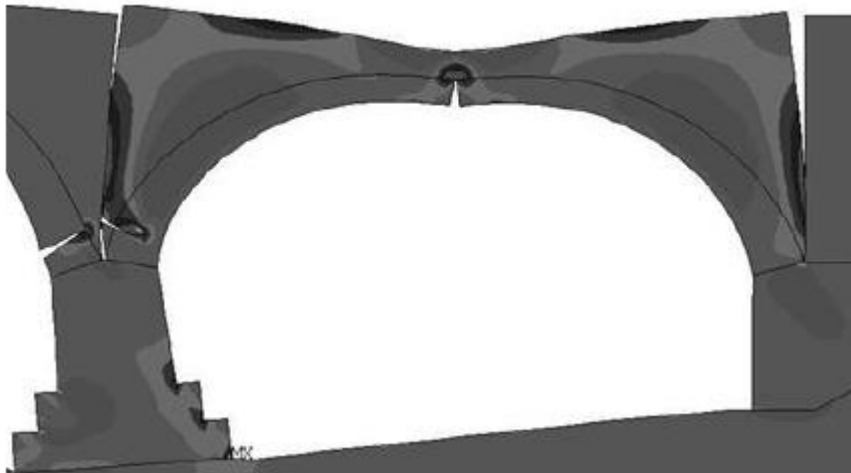
شکل ۲-۵۱- تغییر مکان عمودی کلید قوس در طول بارگذاری

مرحله تکمیلی مطالعه انجام شده بر روی پل مزبور با استفاده از مدل سازی عددی انجام شده است. در این مرحله اجزای مختلف سازه شامل قوس ها، پایه ها، دیوارهای جانبی و خاک تا عمق ۱۰ متری مدل سازی شدند (شکل ۲-۵۲). جهت مدل سازی از المان های ۴ و ۸ گرهی در نرم افزار ANSYS استفاده شده است. نحوه انتخاب المانها به هندسه سازه بستگی داشته بطوریکه در جاهایی که سازه دارای هندسه پیچیده تری بود، از المانهای مرتبه بالاتری استفاده کرده اند. برای مصالح از مدل الاستو پلاستیک با معیار تسلیم دراگر-پراگر استفاده شده است.

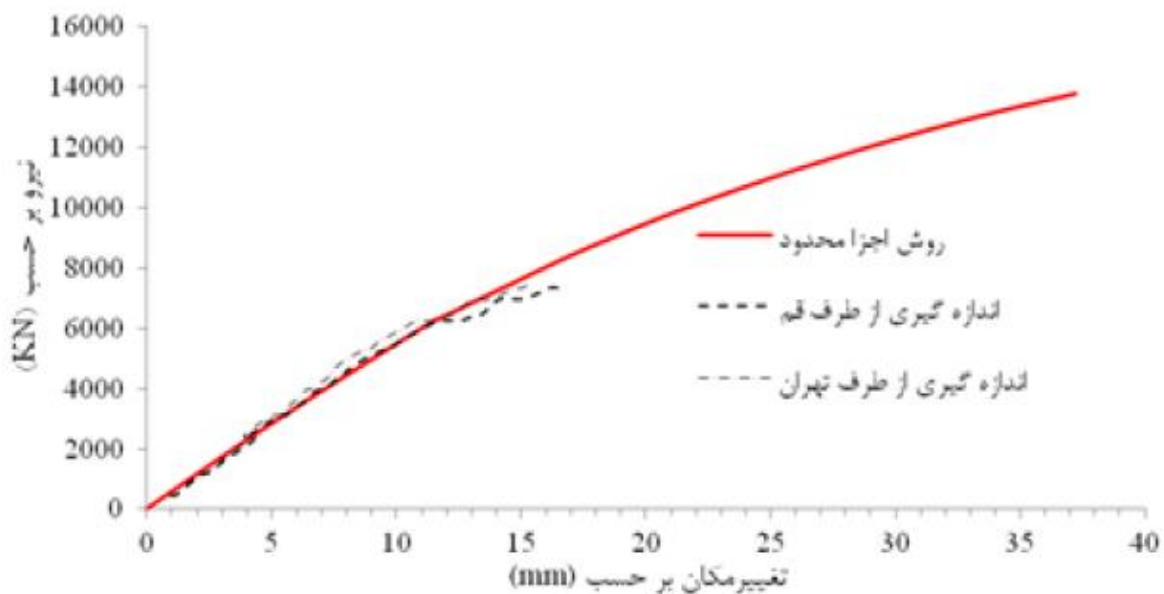


شکل ۲-۵۲- مدل اجزا محدود و شرایط مرزی اعمال شده در محیط نرم افزار ANSYS [۲۹]

پس از پایان مرحله مدل سازی، با استفاده از اطلاعات بدست آمده از مطالعه تجربی، مدل بارگذاری شده و نحوه رفتار و همچنین نمودار نیرو- تغییر مکان قائم پل استخراج شده تا اندازه بار نهایی پل تعیین گردید. در شکل ۲-۵۳ تعدادی از مناطق مفصل پلاستیک تشکیل شده، نشان داده شده است.



شکل ۲-۵۳- تغییر شکل سازه و توزیع تنش در قوس در حد تسلیم



شکل ۲-۵۴- منحنی نیرو-تغییر مکان قائم پل تا بار نهایی [۲۹]

۲-۱۰-۵-۲- مطالعه Fanning – Boothby [۲۳]

در این تحقیق با استفاده از مدل سازی سه بعدی به روش اجزا محدود در نرم افزار ANSYS به بررسی رفتار پل گرفتیت واقع در شهر دوبلین ایرلند پرداخته شده است. همانطور که در شکل ۲-۵۵ نشان داده شده است، پایه های پل مزبور به ندرت برای بازرسی قابل دسترسی است.



شکل ۲-۵۵- پل قوسی سنگی گرفتیت واقع در دوبلین، ایرلند [۲۳]

نمونه مدل عددی ساخته شده از پل مزبور در محیط نرم افزار ANSYS در شکل ۲-۵۶ نشان داده شده است. در مدل کردن یک پل قوسی سنگی چند مشکل وجود دارد که عبارتند از:

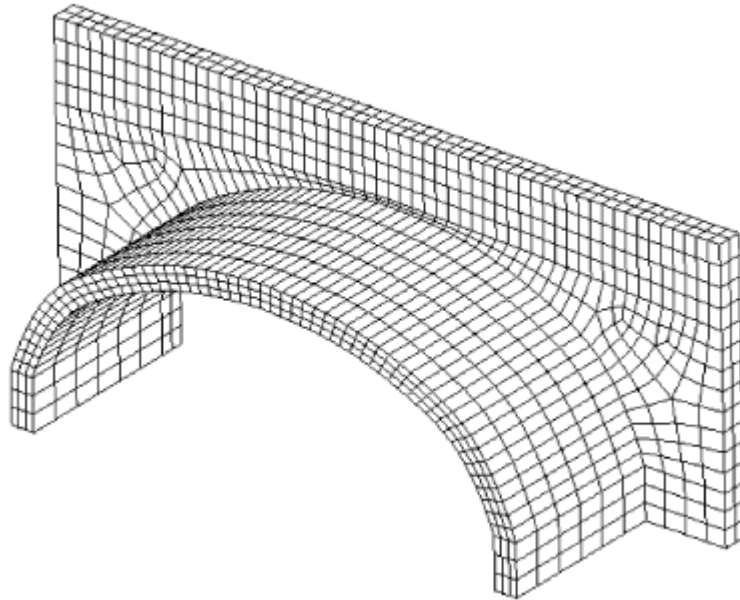
اول اینکه نحوه بدست آوردن مشخصات دقیق مصالح استفاده شده در بلوک های تشکیل دهنده قوس و مواد پر کننده استفاده شده در پل و همچنین نحوه مدل کردن رفتار این مصالح چگونه باشد.

دوم تعیین اندرکنش میان قطعات مختلف مدل می باشد.

همانطور که در شکل ۲-۵۶ مشخص است در این مدل سازی دیواره روی قوس و خود قوس سنگی مدل شده اند. برای ساخت این قطعات در نرم افزار ANSYS از حالت Solid-65 استفاده شده ولی از آنجاییکه جنس مصالح تشکیل دهنده این دو قسمت متفاوت است، و یکی از خاک و دیگری از سنگ است، برای مدل کردن مصالح خاکی از مدل دراگر-پراگر و برای مدل کردن مصالح سنگ از مدل الاستیک استفاده شده است. المان Solid-65 در نرم افزار ANSYS المانی است که توانایی مدل کردن ترک خوردگی را نیز دارد. اندرکنش میان این دو قسمت مدل شده (پل قوسی سنگی و دیواره خاکی)، از نوع اصطکاکی تعریف شده است. به منظور کاهش تعداد المان ها و در نتیجه کاهش حجم محاسبات و زمان تحلیل با استفاده از تقارن، فقط نیمی از پل مدل شده است.

برای مدل کردن پل گرفتیت، مشخصات مصالح تعریف شده در نرم افزار عبارتند از:

مدول یانگ=۱۵ Gpa ، نسبت پواسون=۰٫۲۳ ، جرم مخصوص=۱۷۰۰ Kg /m³ و مقاومت فشاری در حدود ۴۴/۴۳ مگاپاسکال.



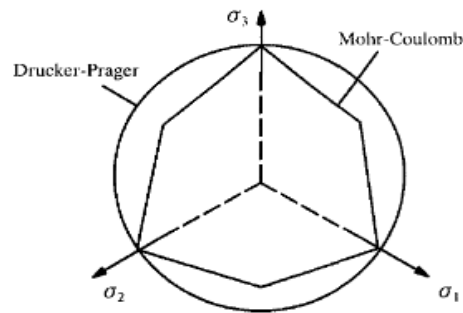
شکل ۲-۵۶- مدل اجزا محدود از نصف پل گریفیت در محیط نرم افزار ANSYS شامل قوس سنگی و دیواره خاکی [۲۳]

مدل دراگر-پراگر مشابه مدل موهر-کولمب بوده و در قالب الاستوپلاستیک کامل است (در مدل موهر-کولمب قانون جریان در حالت برشی به صورت غیروابسته فرض می‌گردد. در استفاده از این مدل بایستی توجه کرد که برخی از جنبه‌های رفتارهای اساسی خاک مانند وابسته بودن سختی به مسیر و تاریخچه تنش و کرنش در آن صرف‌نظر شده و استفاده از این مدل به خصوص در مسائل بارگذاری، باربرداری یا بارگذاری‌های رفت و برگشتی صحیح نخواهد بود). این مدل برای مصالح اصطکاکی همچون خاک‌های شبه دانه ای و مصالحی که تسلیم وابسته به فشار از خود نشان می‌دهند، استفاده می‌شود. این مدل برخلاف مدل موهر-کولمب که دارای سطح تسلیم شش ضلعی در صفحه انحرافی است، دارای سطح تسلیم دایره شکل می‌باشد. پارامترهای لازم برای تعیین این مدل شامل دانسیته، مدول بالک و مدول برشی برای تعیین رفتار الاستیک و مقاومت کششی، دو ثابت مصالح برای تعیین سطح تسلیم و یک ثابت مصالح برای مشخص نمودن قانون جریان می‌باشد.

مدل دراگر-پراگر با سه مولفه (الف) چسبندگی خاک C، زاویه اصطکاک داخلی ϕ و زاویه تورم (اتساع) مشخص می‌شود. سطح تسلیم نشان داده شده در شکل ۲-۲۵، با استفاده از رابطه (۲-۳) مشخص می‌شود:

$$f = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \quad (2-3)$$

در رابطه بالا I_1 ثابت اول تانسور تنش اصلی، J_2 ثابت دوم تانسور تنش انحرافی و k و α ضرایبی هستند که از سطح تسلیم دراگر-پراگر محیط بر سطح تسلیم موهر-کولمب بدست می‌آیند.



شکل ۲-۵۷- مقایسه سطح تسلیم در دو مدل موهر-کولمب و دراگر-پراگر

در این تحقیق علاوه بر مدل سازی عددی پل، با استفاده از روش های تجربی و نصب دستگاه های اندازه گیری در قسمت های مختلف نظیر پایه و قوس پل به تعیین مقادیر جابجایی ایجاد شده در این قسمت ها پرداخته شد. شکل ۲-۵۸ نصب نمونه ای از این دستگاه های اندازه گیری را در پل نشان می دهد.



شکل ۲-۵۸- نصب نمونه ای از وسایل اندازه گیری در سطح پل قوسی گرفتیت [۲۳]

در پایان مدل عددی ساخته شده تحت بارگذاری مشابه آنچه در مطالعه تجربی بر روی پل عبور داده شد، قرار گرفته و نتایج دو روش تحقیق با یکدیگر مقایسه گردید. برای این منظور نتایج دو حالت بارگذاری ۲۱۱۰۰ و ۳۱۲۰۰ کیلوگرمی بر روی پل مقایسه شدند. مقادیر جابجایی ماکزیمم ایجاد شده در پایه پل، قسمت های ماهیچه و تاج قوس، بدست آمده از تحلیل به روش اجزا محدود و مطالعات تجربی صورت گرفته بر روی پل در این دو حالت بارگذاری، به صورت مقایسه ای در جدول ۲-۶ آورده شده است.

جدول ۲-۶- مقایسه نتایج تحلیل اجزا محدود و مطالعات تجربی بر روی پل گریفیت [۲۳]

Truck weight (kg)	Abutment peak displacement (μm)		Haunch peak displacement (μm)		Crown peak displacement (μm)	
	Test	FEM	Test	FEM	Test	FEM
Truck 21,100	32	78	172	237	270	319
Truck B 31,200	41	48.3	331	387	429	544

همانطور که از اعداد این جدول مشخص است محل مقایسه نتایج و همچنین میزان بار وارده بر روی فاصله میان نتایج بدست آمده از تحلیل عددی و مطالعه تجربی اثرگذار است. بطوریکه با افزایش میزان بار وارده بر پل بر دقت جابجایی بدست آمده در پایه پل به روش اجزا محدود افزوده شده ولی از دقت جابجایی بدست آمده از این روش در تاج قوس کاسته می شود.

فصل سوم:

روش‌های تحلیل و بررسی پل‌ها

۳-۱- مقدمه

یک پل قوسی تحت اثر انواع بارهایی که در فصل قبل اشاره شد، از خود عملکرد و رفتاری نشان می‌دهد که می‌تواند رفتاری قابل قبول و ایمن و یا غیرقابل قبول باشد. چنانچه عملکرد پل تحت اثر بارهای وارده بر آن غیرقابل قبول باشد، پل دچار خساراتی شده که این خسارات می‌توانند نهایتاً منجر به خرابی کامل پل گردند. بنابراین تعیین نوع رفتار پل‌ها تحت بارهای وارده بر آنها از اهمیت فراوانی برخوردار است. علاوه بر این برای بالابردن ایمنی استفاده از پل‌ها می‌بایستی فرایند مراقبت، تعمیر و نگهداری پل به صورت مرتب انجام شود، تا هرگونه مشکل و خرابی احتمالی در پل ایجاد شده، مشخص گشته تا نهایتاً با استفاده از روش‌هایی این خسارت رفع گردد.

بررسی و مطالعه رفتار پل‌ها نیازمند تجزیه و تحلیل مدل‌های عددی مناسب ارائه شده برای پل‌ها است. تاکنون مدل‌های مختلفی از سوی محققین مختلف برای تشریح رفتار پل‌ها و از جمله پل‌های قوسی سنگی ارائه شده است. هرچند به سادگی نمی‌توان گفت که کدام مدل بر مدل دیگری برتری دارد (چرا که هر یک از مدل‌های ارائه شده دارای نقاط ضعف و قوت مختص خود بوده و چه بسا مدلی که در موردی خاص بهترین جواب‌ها را می‌دهد در مواردی دیگر و در پلهایی با هندسه‌های متفاوت جواب‌هایی با خطای زیاد بدست دهد)، ولی می‌توان اشاره کرد که انتخاب نوع مدل به الف) سوالات و مواردی که در تحلیل مدل پل به دنبال پاسخ دادن به آن‌ها هستیم (هدف تحلیل) و ب) میزان و نوع منابع و اطلاعاتی که از پل مورد نظر در دسترس داریم. برخی از مدل‌ها به همان اندازه که از دقت بالایی برخوردارند، برای انجام تحلیل نیازمند تعداد زیادی اطلاعات اولیه بوده که چه بسا امکان دستیابی و تعیین همه این اطلاعات وجود نداشته باشد.

در جدول ۳-۱ لیستی از سطوح مختلف بررسی پل‌های قوسی ارائه شده که از روش‌های ساده تجربی شروع و به روش‌های دشوار و پیچیده مدل عددی با استفاده از روش اجزا محدود و مدل‌های مبتنی بر تحلیل قابلیت اعتماد و مباحث احتمالاتی منتهی می‌شود.

۳-۲- ضرورت بررسی رفتار پل‌ها

همانطور که در قسمت‌های قبل نشان داده شد، کشور ایران دارای تعداد زیادی پل‌های قوسی سنگی بوده که از عمر اغلب آنها مدت زمان زیادی می‌گذرد، و به دلیل عدم توجه کافی به مقوله مراقبت، تعمیر و نگهداری پل‌های احداث شده در گذشته و شرایط محیطی نامناسب بسیاری از این پل‌های نیازمند مقاوم سازی و بازسازی هستند. این امر تا زمانی که اولاً شناخت درست از

میزان، نوع و محل خسارات رسیده به پل وجود نداشته باشد (لزوم توجه به روش‌های بازرسی) و ثانیاً پس از تعیین این خسارات، از رفتار و عملکرد موجود پل و عملکردی که از پل انتظار داریم در آینده از خود داشته باشد، درک دقیقی وجود نداشته باشد، امکان پذیر نیست.

جدول ۳-۱- معرفی انواع روش‌های ارائه شده برای تحلیل پل‌های قوسی

ترتیب روش از ساده به دشوار	نام روش
۱	روش تجربی یا مدل دوبعدی - سازه الاستیک خطی
۲	دو یا سه بعدی - الاستیک خطی و یا غیرخطی و یا پلاستیک همراه با ترک خوردگی
۳	دو یا سه بعدی خطی و غیرخطی، الاستیک یا پلاستیک - مدل شبکه ای یا اجزا محدود که در این مدلها امکان در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، ترک خوردگی، بارگذاری‌های خاص و مشخصات دقیق مصالح وجود دارد.
۴	تجزیه و تحلیل به روش اجزا محدود با در نظر گرفتن جزئیات خاص سازه که در سطح قبلی تحلیل در نظر گرفته نمی شود
۵	تجزیه و تحلیل بر مبنای قابلیت اعتماد و مدل‌های احتمالاتی

۳-۳- معرفی انواع روش‌های تجزیه و تحلیل پل‌ها

در ادامه به معرفی انواع روش‌های استفاده در بررسی و تشریح رفتار پل‌های قوسی پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱- روابط تجربی

۳-۳-۱-۱- روابط تاریخی

در سال ۱۷۱۷، Gauter، پنج مرحله مورد نیاز در طول روند طراحی پل‌های قوسی سنگی را به ترتیب ارائه کرد که عبارتند از: [۱۸]

الف) انتخاب شکل قوس

ب) انتخاب ضخامت قوس و کلید قوس

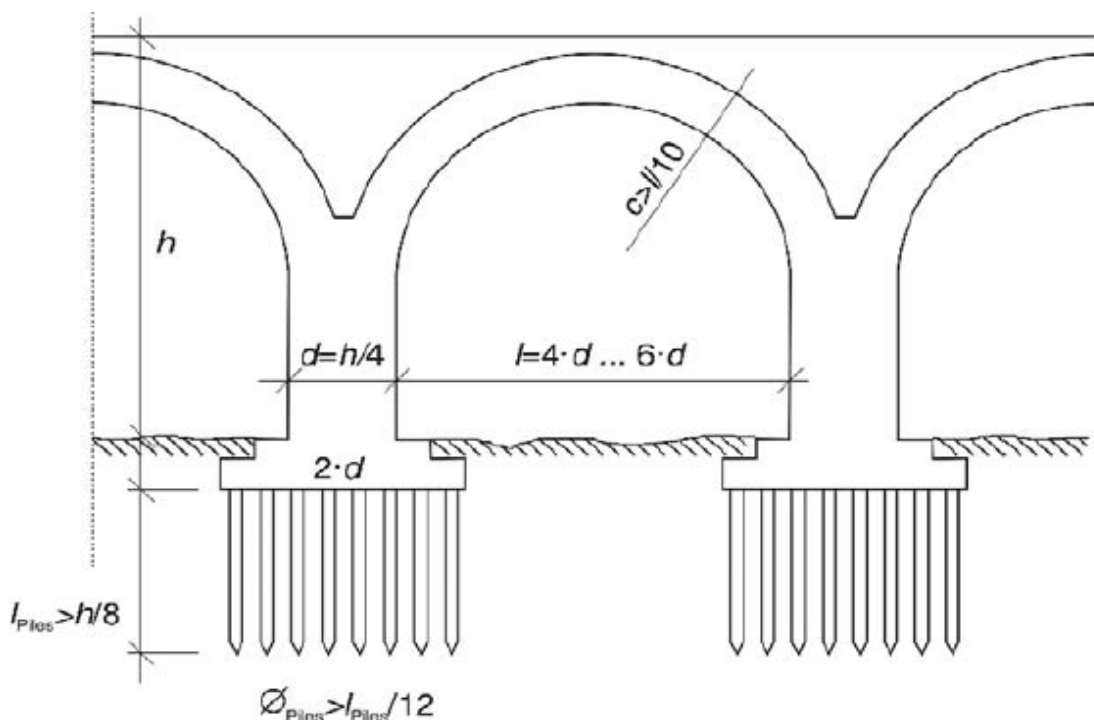
ج) انتخاب ضخامت پایه و فونداسیون

د) انتخاب ضخامت ستونها بسته به طرح در نظر گرفته شده برای پل

ه) انتخاب ضخامت دیواره جناحی پل

در طول زمان ساخت پل‌های قوسی، در حدود ۲۰۰۰ پل قوسی عمدتاً با استفاده از مدل‌های تجربی طراحی شدند. روش‌های تجربی در اینجا با استفاده از قوانین و روابط ساده هندسی، رفتار و مکانیزم تحمل بار پل قوسی را شرح داده که همین نتایج مبنای طراحی اجزای سازه ای پل بوده است. نمونه ای از این قوانین ساده در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. این روابط تجربی توسط "آلبرتی" پیشنهاد شده اند [۳۳]. همانطور که در این شکل مشاهده می شود با مشخص کردن عمق خاکریز روی پل تا کف فونداسیون پل (h)، سایر مشخصات پل نظیر طول دهانه قوس ها، عرض پایه ها، ضخامت قوس و حتی طول شمع های استفاده شده جهت مقاوم سازی فونداسیون معلوم می شود.

در جدول ۳-۲، تعدادی از روابط تجربی ارائه شده توسط Corradi، برای تشریح حالت های تحمل بار و نحوه مکانیزم های شکست رخ داده در قوسهای سنگی، آورده شده است. [۳۴] از آنجاییکه قوس مهمترین عضو سازه ای یک پل قوسی است، این روابط هم برای قوس ها با حالت ها و هندسه های مختلف ارائه شده است. نکته جالب توجه در این روابط این است که برخلاف روابط تجربی قبلی ارائه شده توسط آلبرتی، در اینجا برای مشخص کردن یک رابطه برای یک قوس چندین مولفه و حالت لحاظ شده است.

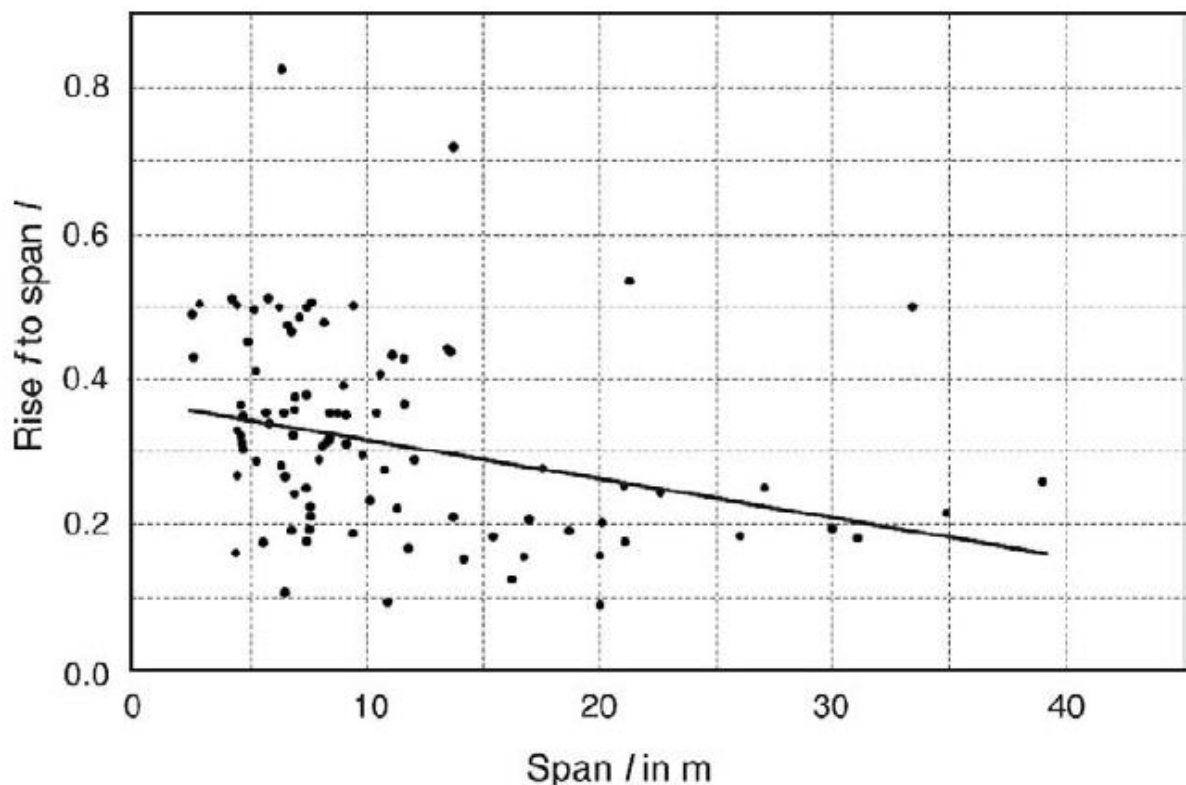


شکل ۳-۱- روابط تجربی برای طراحی پل قوسی ارائه شده توسط آلبرتی در حدود سال ۱۴۵۰ میلادی [۳۳]

قوس همراه با خاکریز افقی قوس همراه با خاکریز گاهش یافته قوس بدون خاکریز

در این جدول R شعاع قوس خارجی، r شعاع قوس داخلی، μ ضریب اصطکاک، α زاویه نقطه شکست، H نیروی افقی در تاج قوس، W وزن قوس و $K=R/r$ است.

پارامترهای اصلی برای تشریح شکل قوس عبارتند از: L طول دهانه قوس و f خیز قوس. این دو پارامتر به صورت ترکیبی در پارامتری نسبی f/L به عنوان اصلی و قدیمی ترین پارامتر در معرفی خصوصیات شکل قوس ها استفاده شده اند. Purtaک [۳۵] در نمودار نشان داده شده در شکل ۳-۲ فراوانی آماری انواع قوس ها برحسب نسبت f/L و طول دهانه قوس برحسب متر، ارائه کرده است.



شکل ۳-۲- تغییرات نسبت خیز قوس به طول دهانه قوس بر حسب طول دهانه قوس براساس فراوانی پل‌ها [۳۵]

علاوه بر نمودار بالا می‌توان از رابطه زیر برای نسبت f/L استفاده نمود:

$$S = \frac{f}{L} = \frac{f}{2a} \quad (۱-۳)$$

برای قوس‌های کامل دایره شکل مقدار S برابر ۰٫۵ است. در قوس‌های ناقص، برای S مقداری بین $\frac{1}{4}$ تا $\frac{1}{6}$ پیشنهاد شده است. از اواخر قرن ۱۸ میلادی که پلهای دسته زنبیلی به شدت رایج شدند در قوس‌های این دسته از پل‌ها مقدار S معمولاً $\frac{1}{4}$ لحاظ شده است. هرچند پلهایی با مقادیر S بسیار کم نظیر $\frac{1}{15}$ و $\frac{1}{16}$ نیز ساخته شده‌اند (نمونه پل نورس در سال ۱۷۹۲ میلادی). [۳۴]

۳-۱-۳- ضخامت قوس در تاج قوس

در سال ۱۶۶۹ فابری [۳۶]، مدلی هندسی از قوس بر مبنای تشکیل سه مفصل، ارائه کرد که بر اساس آن مدل، ضخامت قوس e با استفاده از رابطه (۲-۳) و با معلوم بودن مقدار شعاع خارجی قوس R تعیین می‌شود.

$$e_1 = 2R^{3-2} = 0.343R \quad (۲-۳)$$

بر مبنای مدل هندسی فوق، شعاع داخلی قوس از رابطه (۳-۳) بدست می‌آید:

$$r = R^{4-5} = 0.657R \quad (۳-۳)$$

این روابط به گونه ای ارائه شده اند که خط فشاری (خط رانشی) قوس در محدوده بین قوس خارجی و داخلی قرار گرفته تا اطمینان از عملکرد قوس حاصل شود.

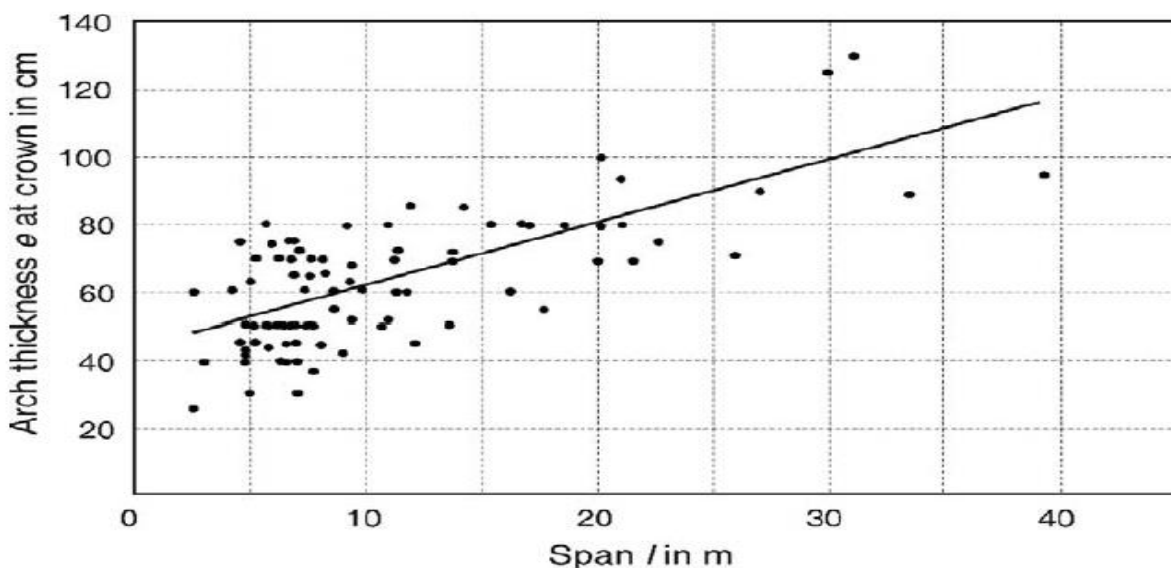
روابط دیگری نیز توسط افراد دیگر ارائه شده است که از آن جمله می توان به رابطه ارائه شده توسط "کوپلت" در سال ۱۷۳۰ میلادی و "هیمن" اشاره نمود:

$$e_{Couplet}=0.096R \quad (۴-۳)$$

$$e_{Heyman}=0.101R \quad (۵-۳)$$

در این روابط، ضخامت قوس بستگی به زاویه شکست در نظر گرفته شده برای قوس دارد بطوریکه در روابط فابری و کوپلت زاویه امتداد شکست قوس ۴۵ درجه ای در رابطه هیمن این زاویه ۵۸/۸ درجه لحاظ شده است. [۳۶]

در سال ۲۰۰۴ میلادی Purtak با استفاده از یک بررسی آماری رابطه میزان فراوانی بین ضخامت تاج قوس برحسب طول دهانه قوس را به صورت نموداری نشان داد (شکل ۳-۳). [۳۵]



شکل ۳-۳- رابطه بین ضخامت تاج قوس و طول دهانه براساس تحقیقات Purtak [۳۵]

۳-۳-۱-۴- روابط تجربی ارائه شده برای ضخامت فونداسیون

علاوه بر اینکه شکل قوس و ضخامت قسمت های مختلف آن نقش مهمی در پایداری پل های قوسی سنگی دارد، می بایستی ضخامت قسمت انتهایی قوس که بخشی از قوس است و بر روی پایه های پل قرار می گیرد نیز به دقت تعیین شود. در اینجا است که بر اساس این ضخامت، ابعاد پایه پل نیز مشخص می گردد. روابط تجربی متعددی برای تعیین ابعاد پایه پل های قوسی تاکنون ارائه شده است. متغیرهای طراحی عبارتند از S_s ضخامت پایه، r خیز یا ارتفاع قوس، L عرض و e ضخامت تاج قوس، h برابر است با فاصله بین خط دهانه و فونداسیون و h_1 معادل ارتفاع دیوار پشتیبان است. بدین ترتیب متغیر H با استفاده از روابط زیر بدست می آید:

$$H=h+f+e+0.6, \quad h_1<0.6m \quad (۶-۳)$$

$$H=h+f+e+h_1, \quad h_1>0.6m \quad (۷-۳)$$

۳-۳-۱-۵- ماکزیمم طول قوس

"و بر" در سال ۱۹۹۹ [۳۷]، رابطه ای برای تعیین طول قوس بر مبنای مصالح استفاده شده در ساخت قوس ارائه نمود (رابطه ۳-۸). رابطه وی با استفاده از تعریف کمیتی موسوم به طول شکست مصالح تعریف شده بود. طول شکست مصالح عبارت است از ماکزیمم طول میله ای ساخته شده از آن ماده بطوریکه مقاومت فشاری یا کششی آن ماده و تنش های ایجاد شده در اثر وزن میله مزبور، معادل باشند. در جدول ۳-۳ مقادیر طول شکست نظیر مصالح مختلف استفاده شده در ساخت پل قوسی آورده شده است.

$$\lim l = \pi \frac{\sigma}{\gamma_w} \quad (۸-۳)$$

جدول ۳-۳- ماکزیمم طول تئوریک دهانه پل‌های قوسی برای قوس های ساخته شده از مواد مختلف [۳۷]

Material	lim / in m
St 37	6,467
GS-52	7,585
Brick masonry	205-748
Natural stone masonry	145-785
Reinforced concrete	228-1870
Lightweight concrete	524-2,244
Coniferous wood	6,912-8,639

۳-۳-۱-۶- ضریب ریسک قوس

یکی از پارامترهای قابل توجه در تعیین و توصیف ظرفیت باربری نهایی یک پل قوسی اصطلاحاً، ضریب ریسک نامیده می شود. از سوی نویسندگان مختلف مقادیر متفاوتی برای این ضریب ارائه شده است. این ضریب با استفاده از رابطه (۳-۹) محاسبه می شود:

$$A = \frac{l\rho}{\gamma} \quad (۹-۳)$$

در این رابطه l طول دهانه به متر و ρ شعاع انحنای قوس است.

پارامتر دیگری که در تجزیه و تحلیل پل های قوسی بسیار کاربردی است، ضریب ریسک اسپنگنبرگ بوده که مقدار آن از رابطه (۳-۱۰) بدست می آید:

$$k = \frac{l^2}{f} \quad (۱۰-۳)$$

که در این رابطه f خیز قوس است. این ضریب بسیار شناخته شده می باشد. و بر در سال ۱۹۹۹ میلادی مقادیر این ضریب برای انواع مختلفی از قوس ها را بدست آورد که در جدول ۳-۴ این مقادیر آورده شده است:

جدول ۳-۴- مقادیر ضریب ریسک اسپنگنبرگ برای قوس های مختلف [۳۷]

شکل قوس	مقادیر ضریب اسپنگنبرگ ارائه شده
قوس سهمی شکل درجه ۲	$8 \cdot \rho$
قوس سهمی درجه ۴	$8 \cdot \rho \cdot (1 - c)$
قوس زنجیری نوع اول	$\approx 8 \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{f^2}{48 \cdot \rho^2}\right)$
قوس دایره ای ناقص	$8 \cdot r \cdot \left(1 - \frac{f}{2 \cdot r}\right)$
قوس سینوسی شکل	$\pi^2 \cdot \rho$
قوس نیم بیضوی	$4 \cdot \rho$

l طول دهانه قوس

f ارتفاع قوس

ρ شعاع انحنا قوس

۳-۳-۲- روابط و قوانین مدرن

۳-۳-۱- روش MEXE

روش MEXE^۱، احتمالاً یکی از بهترین و ساده ترین روش های شناخته شده برای بررسی ظرفیت باربری پلهای قوسی تاریخی است. این روش ابتدا در کشور بریتانیا استفاده شده و به دلیل مزایای آن به سرعت در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفت به طوریکه در سال ۱۹۹۵ در آیین نامه UIC نیز وارد گردید.

کارهای اولیه به منظور توسعه این روش توسط Pippard در سال ۱۹۳۰ میلادی صورت گرفت. فرض اساسی در این روش، در نظر گرفتن رفتار الاستیک خطی برای مصالح تشکیل دهنده پل است. به ویژه در طول جنگ دوم جهانی، روش ارائه شده توسط Pippard توانست به صورت گسترده در بررسی و ارزیابی پل های قوسی تاریخی تحت بارهای نظامی وارده بر آنها، مورد استفاده قرار گیرد. با تغییر بارهای نظامی در گذر زمان، این روش هم تکمیل تر شده تا به روش MEXE رسیده که بر پایه همان روش اولیه ارائه شده توسط Pipprad می باشد. استفاده از این روش ساده و بسیار سریع است، به طوریکه با داشتن اطلاعاتی از شرایط

^۱- Militari Engineering Experimental Establishment

مرزی مسئله نظیر طول دهانه، ارتفاع قوس و ارتفاع خاکریز بالای تاج قوس با استفاده از چند رابطه می‌توان ظرفیت باربری قوس را به سرعت تعیین کرد.

$$Q_{adm} = Q_P \cdot f \quad (۱۱-۳)$$

در این رابطه Q_{adm} ظرفیت باربری نهایی پل قوسی بوده و f ضریبی است که دربرگیرنده پارامترهای متعددی (رابطه ۳-۱۲) از جمله، ضریب شکل، ضریب مصالح، ضریب پیوند، ضریب ضخامت گرهی، ضریب ملات و ضریب شرایط قوس می‌باشد که مقادیر این ضرایب در آیین نامه‌های طراحی آمده است:

$$f = f_S \cdot f_M \cdot f_J \cdot f_C \cdot f_N \cdot \frac{1}{f_\emptyset} \quad (۱۲-۳)$$

با تعیین مقدار ضریب f و با توجه به نمودار ارائه شده در آیین نامه UIC-1995، مقدار Q_P بدست آمده، که از ضرب این دو مقدار ظرفیت باربری نهایی پل قوسی مزبور بدست می‌آید. [۱۱]

با وجود سادگی برخی از تحقیقات اخیر از جواب‌های غیر دقیق این روش در برخی از موارد حکایت داشته که در چند سال اخیر به جهت توسعه روش‌های جایگزین روش MEXE اقدام شده است. که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود.

۳-۲-۲-۳-۳ روش FILEV

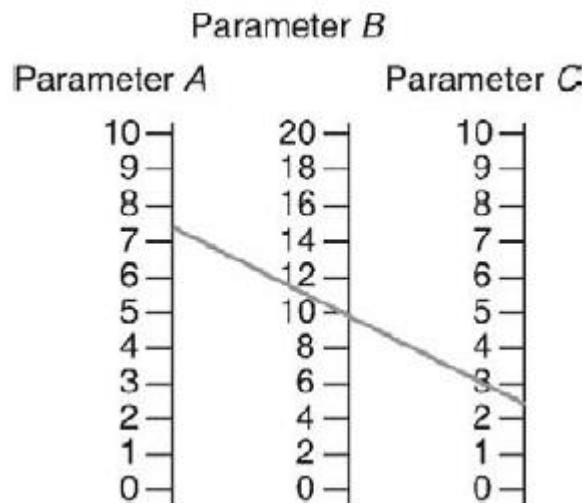
"مارتین کارو" و "مارتینز" در سال ۲۰۰۴ میلادی اقدام به توسعه روش FIELV بر مبنای بررسی نزدیک به ۸۰۰ مدل پل با پارامترهای مختلف و تعیین ظرفیت باربری نهایی هر مدل با استفاده از نرم افزار اجزا محدود Sofistic پرداختند. در این روش برخی حالت‌های جدید برای استقرار بار زنده لحاظ شد و همچنین برای حالت قوس تحت یک بار، مدل مکانیزیم ۴ مفصلی یا شکست برشی در نظر گرفته شد. [۱۱]

بعضی از فرضیات این روش عبارتند از:

- ۱- قوس فقط دارای یک دهانه قوسی است.
- ۲- قوس‌های مجاور هم دارای دهانه‌های مشابه هستند.
- ۳- کوله‌های پل به صورت صلب کامل لحاظ می‌شوند.
- ۴- پل آسیب ندیده فرض شده است.
- ۵- خاکریز پل تو خالی نیست.
- ۶- دهانه پل بین ۲ تا ۲۰ متر است.
- ۷- حداقل نسبت ارتفاع قوس به طول دهانه ۱/۶ است.
- ۸- خاکریز بالای تاج قوس ارتفاعی بین ۰/۲۵ تا ۲ متر دارد.
- ۹- حداکثر ارتفاع پایه یا شمع‌های پل ۱۰ متر است.
- ۱۰- حداکثر عرض پایه‌ها کمتر از $\frac{1}{6}$ دهانه قوس است.

۳-۲-۳-۳- روش ارائه شده توسط Harvey و همکاران [۳۸]

هاروی و همکاران در سال ۲۰۰۷ میلادی، روش جایگزینی را برای روش MEXE ارائه نمودند. آنها نموداری مطابق آنچه در شکل ۳-۴ نشان داده شده است ارائه کردند که با تعیین مقادیر پارامترهای A و C، پارامتر B لازم برای تعیین ظرفیت باربری پل از روی آن نمودار و از به هم وصل کردن خطی مقادیر پارامترهای A و C بدست می‌آید.



شکل ۳-۴- طرح کلی روش هاروی و همکاران [۳۸]

۳-۲-۳-۴- روش ارائه شده توسط Purtak و همکاران

Purtak و همکاران در سال ۲۰۰۷ میلادی [۳۵]، روشی را بر مبنای مدل سازی با استفاده از روش اجزا محدود و در برنامه ANSYS، برای تعیین بار نهایی پل‌های قوسی تاریخی ارائه نمودند. از جمله شرایط در نظر گرفته شده در مدل سازی عددی انجام شده در این روش عبارت است از:

رفتار غیرخطی برای مصالح لحاظ نشده بود و برای مدل کردن رفتار سنگ از مدل موهر-کولمب استفاده شده بود.

در این روش برای تعیین میزان بار نهایی پل قوسی، لازم است مقادیر پارامترها و مشخصات مختلفی از پل معلوم باشد که از آن جمله می‌توان به مشخصات مصالح، ارتفاع، عرض، طول دهانه و ضخامت قوس اشاره کرد.

۳-۳-۳- مدل های تیری

۳-۳-۳-۱- مدل های تیر ساده

نیاز به وجود روش های ساده که بتوان بدون نیاز به محاسبات پیچیده و نرم افزارها، و با استفاده از دست، مشابه آنچه در تحلیل سازه های معین انجام می شود، سبب به وجود آمدن و گسترش روشی موسوم به مدل تیر ساده شده است. در طول زمان مدل‌های تیری با در نظر گرفتن نقش عوامل مختلف در تحلیل خود به صورت فزاینده ای گسترده تر شده و نتایج بدست آمده از

آنها نیز دارای دقت بیشتری گردید. سیر تحول انجام شده در مدل تیری در جدول ۳-۵ آورده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود، در حالیکه در اولین مدل ها به صورت ساده فقط تعدادی مفصل در قوس از پیش تعریف شده بود، در ادامه اثرات خاکریز، فونداسیون الاستیک و سازه جاده نیز لحاظ گردید.

جدول ۳-۵- تکامل مدل های تیری برای پل های قوسی [۱۱]

Type of model	Visualization
قوس مفید بدون خاکریز	
قوس دو مفصلی بدون خاکریز	
قوس سه مفصلی بدون خاکریز	
اثر خاکریز لحاظ شده است	
اثر بار جاده لحاظ شده است	

۳-۳-۲- مدل تیر مرکب

مدل تیر ساده برای پل هایی با شرایط و مشخصات هندسی ساده می باشد به طوریکه با پیچیده شدن این شرایط نظیر وقتی که ضخامت قوس در طول قسمت های آن تغییر می کند و یا ارتفاع خاکریز قرار گرفته بر روی خاکریز ثابت نبوده و تغییر کند، دیگر مدل تیر ساده موثر نبوده و جواب های دقیقی را بدست نمی دهد و نیاز به استفاده از مدل های سطح بالاتر نظیر مدل تیر مرکب است. در این روش روابطی برای تعیین موقعیت خط فشاری (رانشی) قوس a ، ارائه شده است که از آن جمله می توان به رابطه (۳-۱۳) اشاره نمود:

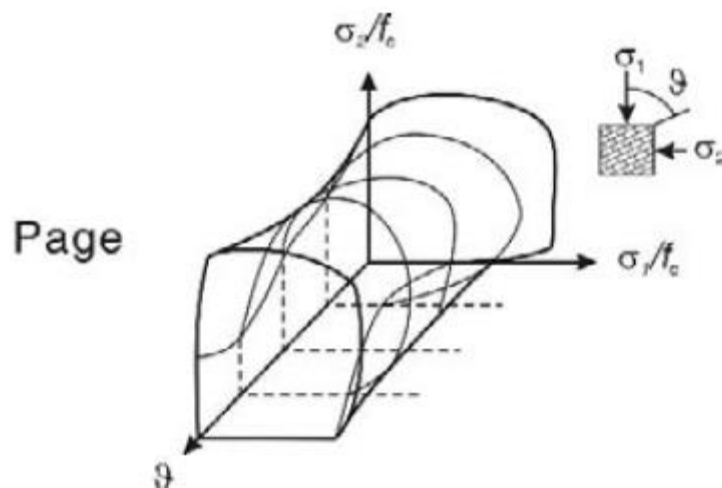
$$a = \frac{1}{2} \cdot \frac{(EA)_r \cdot (h_1 + h_2)}{\sum (EA)_i} \quad (3-13)$$

که در رابطه بالا، E_1 و E_2 به ترتیب مدول یانگ برای قوس و خاکریز، A مساحت سطح مقطع، h ارتفاع نظیر هر یک از دو قسمت قوس و خاکریز است.

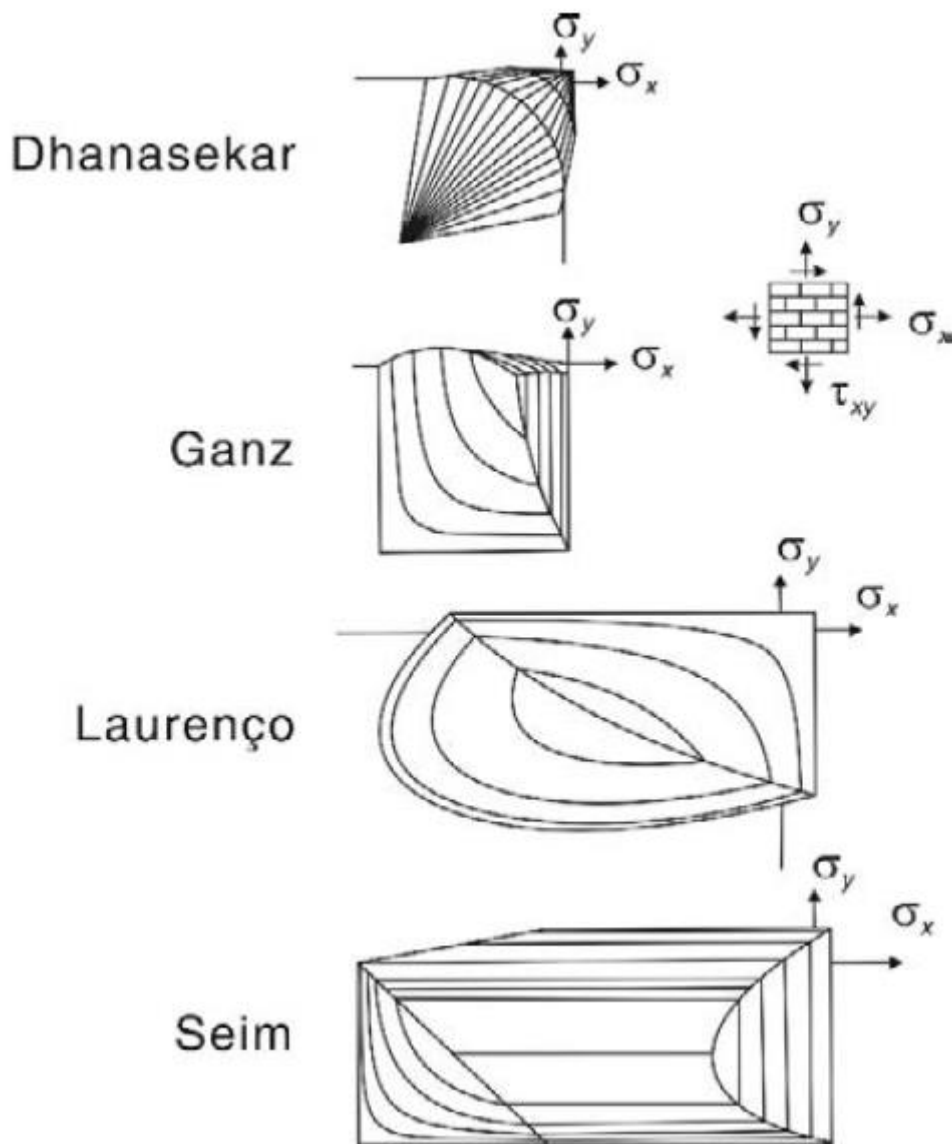
در واقع در روش تیر مرکب به مجموعه قوس و خاکریز همچون تیر با مقطع مرکب برخورد کرده و مشابه آنچه در تبدیل یک مقطع مرکب به مقطع ساده انجام می‌گرفت در اینجا هم صورت می‌گیرد.

۳-۴- روش اجزا محدود (FEM)

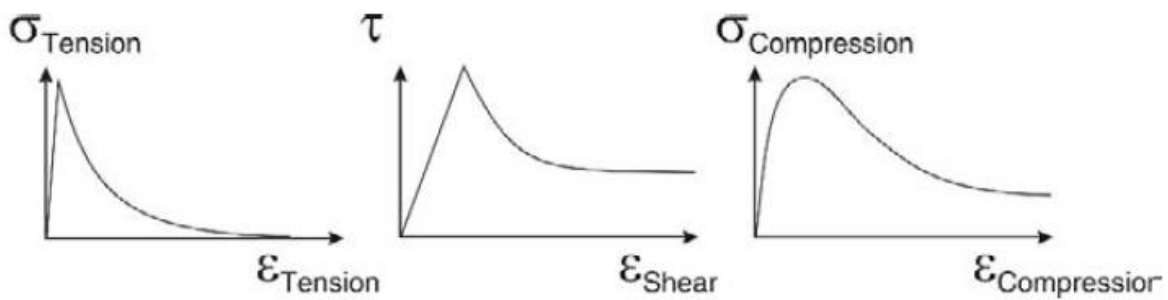
روش اجزا محدود برای مدل کردن پل‌های قوسی سنگی و بتنی بسیار رایج می‌باشد. اولین بار Towler در سال ۱۹۸۵ میلادی با استفاده از روش اجزا محدود به بررسی و تحلیل یک پل قوسی پرداخت. از آن زمان تا کنون تعداد زیادی برنامه بر اساس این روش ارائه شده است که توانایی در نظر گرفتن رفتار واقع بینانه‌ای از مصالح سنگی و اندرکنش میان قطعات سازه‌ای مختلف پل را دارا می‌باشند. در این روش‌ها سطوح شکست مصالح بر اساس مدل‌های مختلف ارائه شده توسط محققان مختلف ارائه شده است. در ادامه تعدادی از مدل‌های ارائه شده برای سطوح شکست مصالح سنگی آورده شده است.



شکل ۳-۵- سطح شکست مصالح سنگی براساس نتایج آزمایش Page - ۱۹۸۳ میلادی [۳۹]



شکل ۳-۶- سطوح شکست مصالح سنگی بر مبنای تحقیقات Seim (۱۹۹۸) و Lourenco (۱۹۹۶) [۱۱]



شکل ۳-۷- رابطه تنش- کرنش برای مصالح سنگی در فشار، برش و کشش بر مبنای تحقیقات Schlegel (۲۰۰۴) [۴۰]

۳-۳-۵- روش اجزای گسسته (DEM)

در روش اجزا محدود می‌تواند در اثر رخ دادن ترک‌های بزرگ در دامنه مدل، به دلیل مشکلات عددی پیش آمده مشکلات فراوانی در خصوص همگرایی مسئله و نتایج به وجود آید. علاوه بر این استفاده از این روش با فرض رفتار مصالح همگن برای نواحی که مصالح رفتار همگنی از خود نشان نمی‌دهند، نمی‌تواند منجر به نتایج دقیقی شود. به این دلایل یک روش جدیدی ارائه شده است که از آن با عنوان روش المان‌های گسسته و یا المان‌های مجزا نام برده می‌شود.

در حالت کلی روش المان‌های مجزا برای شبیه‌سازی حرکات تعداد محدودی المان‌های یک جسم تحت اثر فعل و انفعالات خاص و جدا از سایر المان‌های آن جسم می‌باشد. اگرچه ارتباط بین این دو دسته المان قطع نبوده و حفظ می‌شود.

۳-۴- مقایسه بین نتایج مطالعات تجربی و مدل‌سازی

۳-۴-۱- آزمایش‌های بارگذاری روی قوس

دقت نتایج بدست آمده از تحلیل عددی می‌بایستی با مشاهدات تجربی مقایسه و راستی‌آزمایی شوند. در این مورد مقایسه‌ای بین ظرفیت حمل بار نهایی بدست آمده از دو روش، انجام می‌شود. این آزمایشات بارگذاری بر روی قوس، قدمتی بیش از یک قرن دارند. گزارش اولین آزمایش بارگذاری انجام شده بر روی پل‌های قوسی در مجله معماری و مهندسی استرالیا در سال ۱۸۹۵ میلادی چاپ شده است. این گزارش مربوط به آزمایش انجام شده بر روی قوس‌های ساخته شده از بتن مسلح و بتن غیرمسلح به طول دهانه ۲۳ متر است. [۴۱]

از آن زمان تا کنون آزمایشات بارگذاری متنوعی بر روی پل‌های مختلف در سراسر جهان انجام شده است. این آزمایشات معمولاً محدود بوده و بنابراین از نتایج بدست آمده از آنها در تکمیل داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی عددی استفاده کرد و یا اینکه به صورت کامل انجام شده بطوریکه منجر به مشخص شدن منحنی ظرفیت بار نهایی پل شده است.

فصل چهارم:

خسارات وارده به پل ها و روش های مقاوم سازی

۴-۱- مقدمه

همانطور که در فصول گذشته نیز عنوان شد، پلها از آنجاییکه در معرض بارها و شرایط محیطی مختلف قرار دارند، وقوع خسارت و آسیب در قسمت های مختلف آنها در طول دوره عمرشان طبیعی به نظر می رسد. این امر در مورد پل های ساخته شده از مصالح بنایی و قدیمی حادث می باشد. نکته مهم در اینجا وقوع آسیب در قسمتی از پل نبوده بلکه تشخیص به موقع آن (قبل از اینکه خسارت موضعی به دلیل عدم توجه و تعمیر لازم به قسمت های دیگر پل گسترش یابد) و سپس ارائه راهکارهای مناسب برای تعمیر و مقاوم سازی پل در مقابل این آسیب می باشد. بنابراین لزوم راهکارهایی برای پایش سلامت پل ها امروزه امری ضروری است. از جمله روش های بررسی وضعیت ایمنی و عملکردی پل ها، تجزیه و تحلیل رفتار پل ها با استفاده از انواع مدل های ارائه شده در فصل قبل، مخصوصا مدل سازی عددی به روش اجزا محدود توسط انواع مختلف نرم افزارهای تجاری موجود می باشد. نکته مهم دیگر، روش های بازرسی پل بوده که در ادامه این فصل به تعدادی از این روش ها اشاره می شود.

در فصول قبل به عوامل ایجاد خسارت در پل ها و چگونگی وارد آمدن این خسارت ها توسط این عوامل اشاره گردید. پس از وارد آمدن این خسارات به پل و مشخص شدن نقاط آسیب دیده و یا بحرانی توسط روش های بازرسی یا با استفاده از تجزیه و تحلیل مدل های پل، حال نوبت به مقاوم سازی پل رسیده که در این فصل به تعدادی از روش های مقاوم سازی پلها نیز اشاره می شود.

۴-۲- روش های بررسی و آزمایش بر روی پل ها

بخش مهمی از هر بازرسی این است که در گام نخست مشخص کنیم این سازه چگونه ساخته شده بوده و مواد و مصالح استفاده شده در پل در هنگام ساخت چه بوده اند، هندسه و ابعاد قسمت های مختلف پل چه مقادیری است و در نهایت اینکه رفتار مصالح و شرایط بارگذاری اعمالی چگونه است. اولین گام در فهم پل استفاده از عکس ها و نقشه های مختلف موجود، چه در هنگام ساخت و چه از وضع فعلی سازه می باشد. در مرحله بعد انجام آزمایشات میدانی که می تواند در ابتدا به صورت غیر مخرب انجام شود. از آنجاییکه خواص مصالح استفاده شده و همچنین رفتار و شرایط بارگذاری پل در طول آن می تواند تغییر کند و این احتمال در پل های ساخته شده از مصالح بنایی بیشتر است لذا می بایستی این نمونه گیری ها در نقاط مختلف پل انجام شود.

هنگامی که بنا بر نوع اطلاعات مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل پل، نیاز به انجام آزمایشات مخرب باشد، این آزمایشات تعمیرات اضافی ناشی از انجامشان را بر پل تحمیل می‌کنند. اولین گام، بازرسی چشمی از پل بوده که در خلال آن عیوبی نظیر ترک خوردگی‌ها، پوسته پوسته شدن، جابجایی، از بین رفتن ملات بین سنگ‌ها در قسمتی از پل و دیگر نشانه‌های آسیب دیدگی، آشکار می‌شود. در طول بازرسی‌های چشمی و یا آزمایش‌های غیرمخرب نظیر چکش زدن یا خراشیدن ملات اطلاعات مهمی در مورد وضعیت فعلی قسمت‌های مختلف پل نظیر قوس، دیوارحائل و کوله‌ها بدست می‌آید.

۴-۳-۳- آزمون‌های غیرمخرب

۴-۳-۱- چکش برجهنده

چکش برجهنده شامل استفاده از یک چکش با نیروی ثابت و تفسیر صدای برخورد چکش و دوباره به جای اول خود برگشتن چکش می‌باشد. از این آزمایش می‌توان برای تشخیص و شناسایی حفره‌های بزرگ در نزدیکی سطح و یا جداسازی ایجاد شده استفاده نمود. این آزمایش روشی ساده و ارزان است.

۴-۳-۲- آزمون بار

این آزمون هم شامل بارگذاری پل و تعیین ظرفیت باربری نظیر آن می‌باشد و معمولاً توسط وسایل نقلیه انجام می‌شود. بارگذاری وارده بر پل افزایش یافته و خسارات مشاهده شده در پل گزارش می‌شود.

۴-۳-۳- نمونه برداری و مغزه گیری

نمونه برداری در درک رفتار پل به ویژه مشخصات مصالح پل می‌تواند بسیار مفید باشد. بعضاً به دلیل خسارت‌های رسیده به پل امکان برداشتن یک یا چند بلوک از آن می‌باشد. در بعضی از موارد نیز با استفاده از ابزارها سوراخ‌هایی در پل ایجاد شده و مواد درون آن قسمت بیرون آورده شده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد. از این روش بیشتر برای تشخیص مشخصات ملات‌ها استفاده می‌شود (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱- نمونه‌ای از سوراخ ایجاد شده در قسمتی از پل سنگی [۴۲]

۴-۳-۴- آزمون جک تخت

این آزمون یک تقریب خوبی از رفتار تنش- کرنش مصالح بنایی بدست می‌دهد. در این روش یک برش عمودی در سنگ ایجاد شده و اجازه داده می‌شود تا این برش بسته شود. مقادیر جابجایی در بالا و پایین برش اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه جک تخت در داخل برش قرار گرفته و فشار به تدریج افزایش می‌یابد. مقادیر جابجایی توسط ابزارهای سنجش جابجایی تعیین و بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان مقادیر تنش را تعیین کرد.

۴-۳-۵- آزمون توسط پالس‌های ماورای صوت

با استفاده از امواج مافوق صوت و مدت زمانی که طول می‌کشد تا این امواج فاصله‌ای را طی کنند، می‌توان پارامترهایی چون چگالی مصالح را تعیین کرد. هر چند فرکانسی که باید استفاده شود نیاز به کالیبره کردن داشته و به نوع مصالح بستگی دارد. مثلاً فرکانس‌های پایین (۱ تا ۱۰ کیلوهرتز) در پل‌های سنگی قدیمی یا آسیب دیده کاربرد دارد. [۴۳]

۴-۴- تعمیر و روش‌های مقاوم سازی پل‌های قوسی سنگی

۴-۴-۱- مقدمه

ارائه روش‌های مختلفی برای مقاوم سازی و تعمیر پل‌های قوسی سنگی با توجه به تفاوت‌های موجود میان این پل‌ها امری ضروری است. به ویژه اینکه خسارت‌های متفاوتی در این پل‌ها بسته به شرایطی که هر یک از پل‌ها در آن قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود. در انتخاب این روش‌ها مهندسان و طراحان می‌بایستی به موارد زیر توجه داشته باشند:

- ۱- مشخص کردن دقیق محل تعمیر
- ۲- مواد مورد استفاده در عملیات بهسازی
- ۳- روش اجرا عملیات بهسازی
- ۴- مزایا و معایب این روش
- ۵- نقش روش انتخاب شده بر روی ظاهر و عملکرد پل
- ۶- هزینه اجرای عملیات

۴-۴-۲- سازگاری و دوام عملیات اجرایی

عملیات بهسازی پل ممکن است با استفاده از موادی مانند بتن، رزین، چسب رزین، خاک یا ملات‌های مختلف انجام گیرد. نکته مهم این است که مواد جدیدی که به عنوان تعمیر قسمت آسیب دیده استفاده می‌شوند، با مصالح قدیمی و اولیه موجود در پل سازگاری داشته و مجموعه بتوانند به یک عملکرد یکپارچه دست یابند. از طرفی باید بررسی گردد هر یک از این مواد در کنار یکدیگر چه واکنش شیمیایی داشته و این واکنش‌ها اثرات مخربی را به همراه نداشته باشد بطوریکه روش استفاده شده برای مقاوم سازی و تعمیر پل خود عاملی برای وارد آمدن خسارت‌های جدید به پل گردد. علاوه بر این موادی که برای طرح تعمیر قسمت آسیب دیده پل استفاده می‌شوند می‌بایستی از کیفیت مطلوبی برخوردار بوده به طوریکه برای مدت زمانی دوام داشته و بتوانند به عملکرد خود ادامه دهند. چرا که مقرون به صرفه نیست استفاده از مواد بی کیفیت که منجر به تکرار عملیات بهسازی برای دوره ۴ یا ۵ ساله گردد.

۴-۴-۳- انتخاب روش استفاده شده برای عملیات بهسازی

انتخاب بهترین روش بهسازی مسئولیتی است که برعهده مهندس طراح بوده و با استفاده از نتایج بررسی های چشمی، آزمون های غیرمخرب و یا تحلیل های انجام شده بر روی مدل عددی پل توسط نرم افزارهای مرتبط، انجام می شود. علاوه بر این مهندس طراح می بایستی برآوردی از میزان عملکرد روش انتخابی و نقش آن در بهبود رفتار پل داشته باشد.

۴-۴-۴- معرفی روش های مختلف تعمیر و مقاوم سازی

۴-۴-۴-۱- تزریق

عملیات تزریق (یا تزریق مجدد) برای پر کردن حفره ای ایجاد شده در قوس و یا خاکیز روی قوس استفاده می شود. عملکرد کامل قوس پل معیاری است که ایمنی پل قوسی تحت بارهای وارده بر آن را تضمین می کند. این روش اغلب برای پر کردن حفرات ناشی از ترکهای ایجاد شده بین بلوک ها و یا بین قوس و خاکیز استفاده می شود. آنچه عملکرد مناسبی به قوس می دهد این است که قطعات و بلوک های تشکیل دهنده قوس عملکرد یکپارچه ای داشته و جدایی بین آنها نباشد و این وظیفه برعهده ملات های موجود بین بلوک ها است. بنابراین چنانچه قسمتی از ملات های بین بلوک ها از بین رفته باشد و در نتیجه جدایی بین بلوک ها ایجاد شده باشد می بایستی، قسمت های جدا شده توسط عملیات تزریق دوباره پر شوند.

عملیات تزریق به تنهایی هیچگونه افزایش ظرفیت باربری را برای پل ایجاد نمی کند بلکه سبب شده تا پل عملکرد اولیه ای که برای آن در نظر گرفته شده بود را به درستی انجام دهد. بنابراین جزء روش های تعمیر پل ها قرار می گیرد. ملات استفاده شده برای تزریق باید با دقت انتخاب و طراحی شود. انتخاب آن براساس هماهنگی بین جنس بلوکهای تشکیل دهنده قوس و همچنین ملات های باقی مانده در حفرات است.

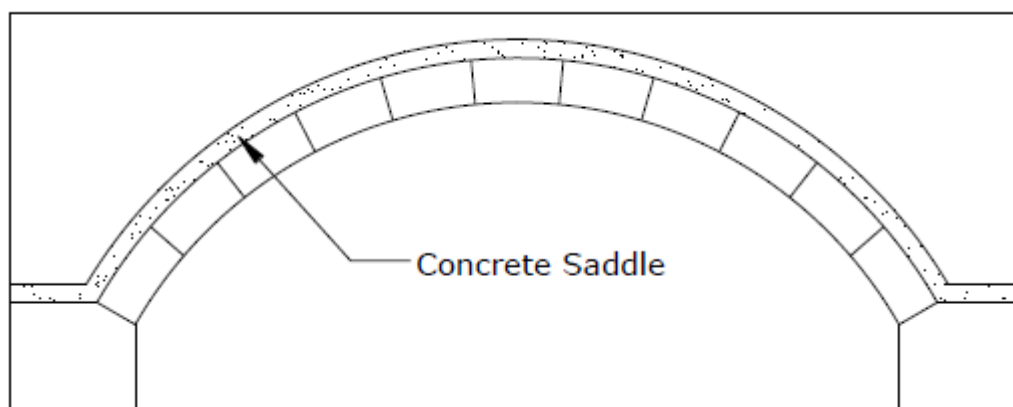
عملیات تزریق میتواند به سرعت و بدون دخالت در جریان ترافیکی عبوری از پل و اختلال در کارایی آن انجام شود. نکته مهم این است که باید دقت شود سوراخ های تعبیه شده برای زهکشی در طول عملیات تزریق پر نشده باشد. هزینه این روش کم بوده و بخش عمده آن هم به اجرت کارگران بر میگردد. این عملیات می بایستی به گونه ای انجام شود که سبب آسیب به ظاهر پل نگردد.

۴-۴-۴-۲- جایگزین کردن بلوک ها

در پل های سنگی اغلب یک یا تعدادی از بلوک های تشکیل دهنده پل به ویژه آنها که در لبه ها قرار گرفته اند، در معرض جدا شدن از بقیه بلوک ها قرار دارند. نبودن این بلوک ها می تواند باعث افزایش تنش های ایجاد شده در قوس در آن قسمت شده و این اضافه تنش به سایر قسمت های قوس نیز منتقل گردد. بنابراین برای جلوگیری از بدتر شدن وضعیت پل می بایستی بلوکی، جایگزین فضای خالی موجود گردد. آجر یا سنگ جایگزین شده علاوه بر اینکه می بایستی سازگار با بلوک های کناری بوده و از دوام کافی هم برخوردار باشد، می بایستی از نظر رنگ، اندازه و ظاهر هم در هماهنگی با بقیه بلوک ها باشد.

۳-۴-۴-۴- Saddling روش

در این روش که شامل ایجاد حفره در بخشی از پل (نظیر قسمت خاکریز روی قوس) و سپس تزریق بتن درجا درون سوراخ ایجاد شده می‌باشد، بتن سازگاری بیشتری با سنگ داشته و سبب یکپارچه کردن دو قسمت پل و یا جلوگیری از نفوذ آب به داخل قوس می‌کند (شکل ۲-۴). بتن استفاده شده در این روش میتواند دارای ضخامت‌های مختلف باشد.



شکل ۲-۴- بتن کمر بند با ضخامت یکنواخت استفاده شده بین قوس و خاکریز روی آن

۳-۴-۴-۴- استفاده از قوس بتنی در زیر قوس

یکی دیگر از روش‌های تعمیر و مراقبت از پل‌های سنگی که بعضاً برای افزایش ضخامت قوس و در نتیجه افزایش توان باربری آن نیز به کار می‌رود، استفاده از قوس بتنی در قسمت داخلی قوس سنگی است. این روش برای جلوگیری از اثرات محیطی بر روی جداره قوس سنگی که در تماس با محیط قرار دارد نیز به کار می‌رود (شکل ۳-۴ و ۴-۴).



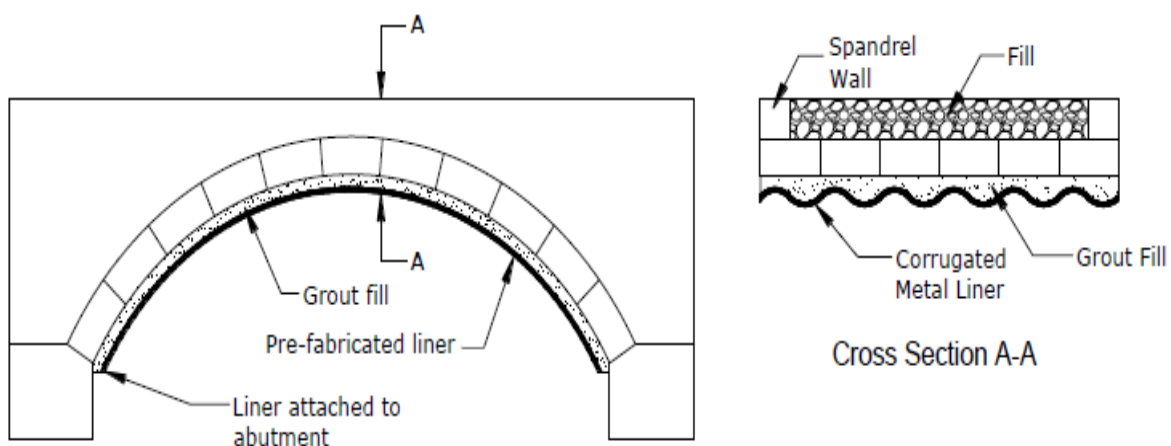
شکل ۳-۴- قوس بتنی کل وجه بیرونی قوس و پایه‌های آن را پوشانده است [۴۴]



شکل ۴-۴- قوس بتنی فقط قسمت نمای تحتانی قوس سنگی را پوشانده است.

۴-۴-۵- استفاده از میله‌ها و تسمه‌های پیش ساخته

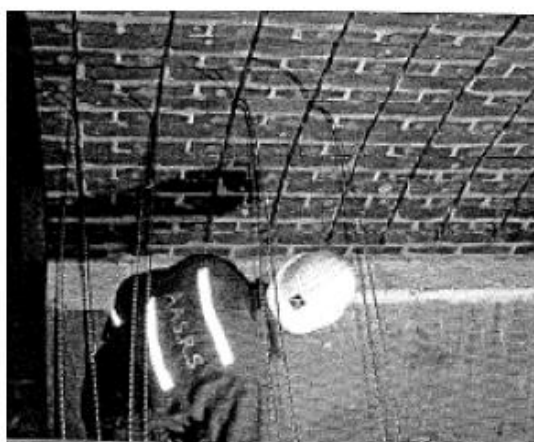
این میله‌های پیش ساخته که معمولاً از فولاد یا سیمان مسلح شده هستند به زیر طاق قوس متصل شده و فضای بینشان به وسیله بتن با گروت به دیواره قوس متصل می‌شود. این روش سبب افزایش مقاومت قوس شده و ظرفیت باربری آن را اضافه می‌کند. علاوه بر این هنگام پر کردن فضای بین میله‌ها و جداره قوس بخشی از خلل و فرج ایجاد شده نیز پر می‌شود (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵- استفاده از میله یا ورق فلزی در زیر طاق قوس

۴-۴-۶- روش‌های تقویت نزدیک به سطح

از این روش می‌توان برای ترمیم طیف وسیعی از مشکلات مشاهده شده در پل‌های سنگی استفاده نمود. در این روش ابتدا حفراتی را در سطح پل ایجاد کرده سپس فولاد ضد زنگ را در این فضاها قرار داده، میله‌ها با گروت به سطح پل متصل می‌شود. این روش برای کنترل عرض ترک‌های موجود و گسترش ترک خوردگی در سطح پل بسیار موثر است (شکل ۴-۶).



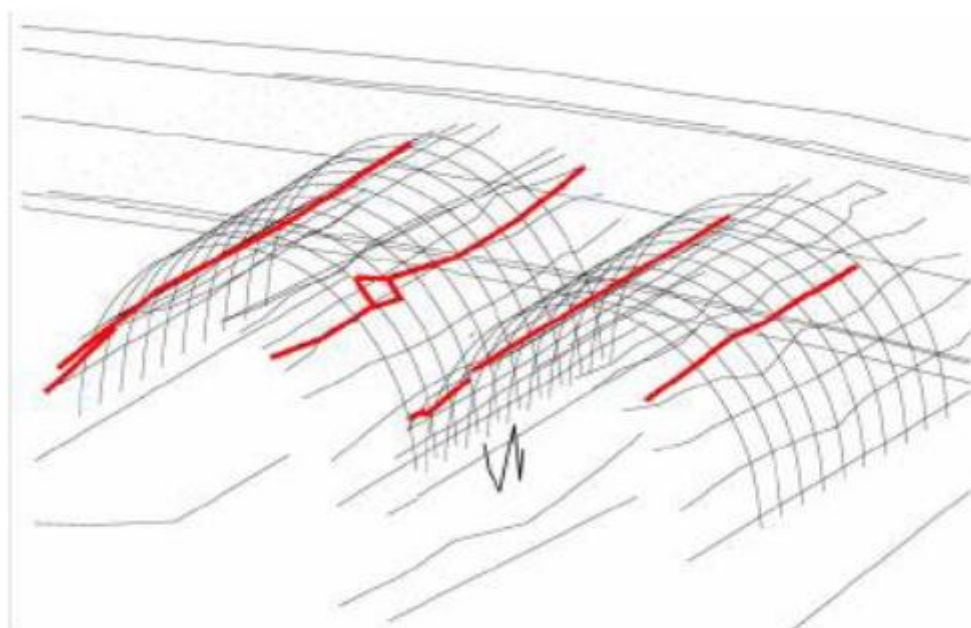
(a)



(b)

شکل ۴-۶- قرار دادن میلگرد و تسمه‌های فولادی در داخل شیارهای ایجاد شده در سطح و سپس پر کردن شیارها با گروت [۴۵]

روش دیگر استفاده از میلگردهای طولی در طول قوس می‌باشد که در شکل ۴-۷ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۴-۷- استفاده از میلگردهای طولی جهت تقویت پل قوسی [۴۶]

۴-۴-۷- استفاده از ورق های FRP

الیاف استفاده شده در ورق های FRP دارای جنس های مختلفی نظیر کربن، آرامید و شیشه می باشند. الیاف شیشه معمولاً دارای مدول یانگی معادل ۷۰ گیگاپاسکال بوده و دارای مقاومت نسبتاً کمی در مقابل سایش هستند. الیاف آرامید از جنس مواد آلی بوده و دارای چقرمگی بالایی هستند. اشکال الیاف آرامید این است که امکان دارد چنانچه در معرض نور خورشید قرار بگیرد ۵۰ درصد مقاومت خود را از دست بدهند و علاوه بر این در مقابل رطوبت نیز حساس هستند. در کارهای مهندسی معمولاً از الیاف کربنی استفاده می شود. این الیاف دارای مقاومت کششی و مقاومت بالاتری نسبت به شیشه و آرامید بوده و حساسیت کمتری نیز در مقابل خراش و پارگی دارند.

سیستم های FRP که بر سطح خارجی سازه نصب می شوند معمولاً به دو دسته زیر طبقه بندی می شوند:

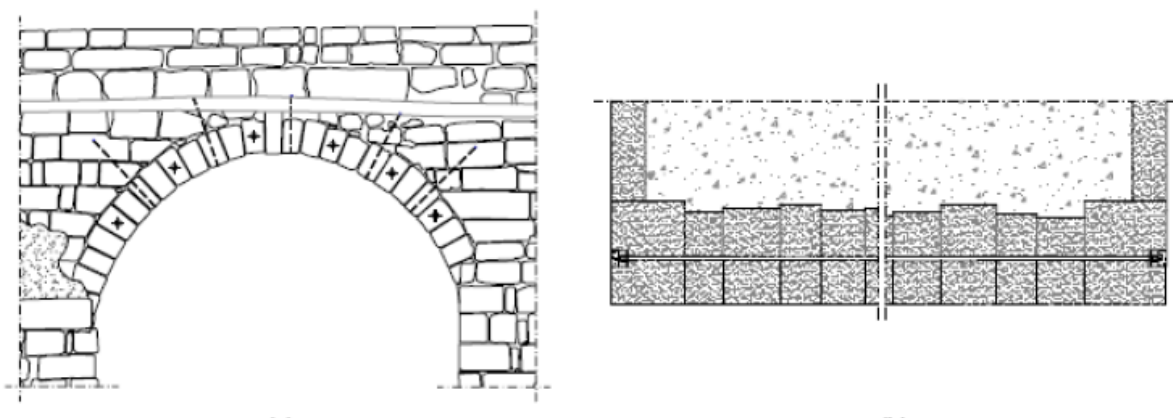
ورق هایی که پس از آغشته شدن به چسب بر روی سطح گسترده می شوند.

ورق هایی که در حین فرآیند تولیدشان به چسب آغشته شده اند و کافی است بر روی سطح گسترده شوند.

مزیت استفاده از FRP در این است که ظاهر پل را عوض نکرده و فضای قابل توجهی از پل را اشغال نمی کند و بار مرده زیادی هم بر پل تحمیل نمی کند هرچند خطر بلند شدگی ورق ها و مختل شدن عملکردشان وجود دارد.

۴-۴-۸- روش دوختن

در این روش دو قسمت از پل برای دستیابی به عملکرد یکپارچه به وسیله میلگرد یا تسمه های فولادی که در آن دو نقطه به بدنه پل متصل شده اند، اصطلاحاً به یکدیگر دوخته می شوند (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸- استفاده از روش دوختن به وسیله تسمه فولادی برای یکپارچه کردن قوس [۴۷]

فصل پنجم:

مطالعه موردی یک پل قوسی سنگی

۵-۱- مقدمه

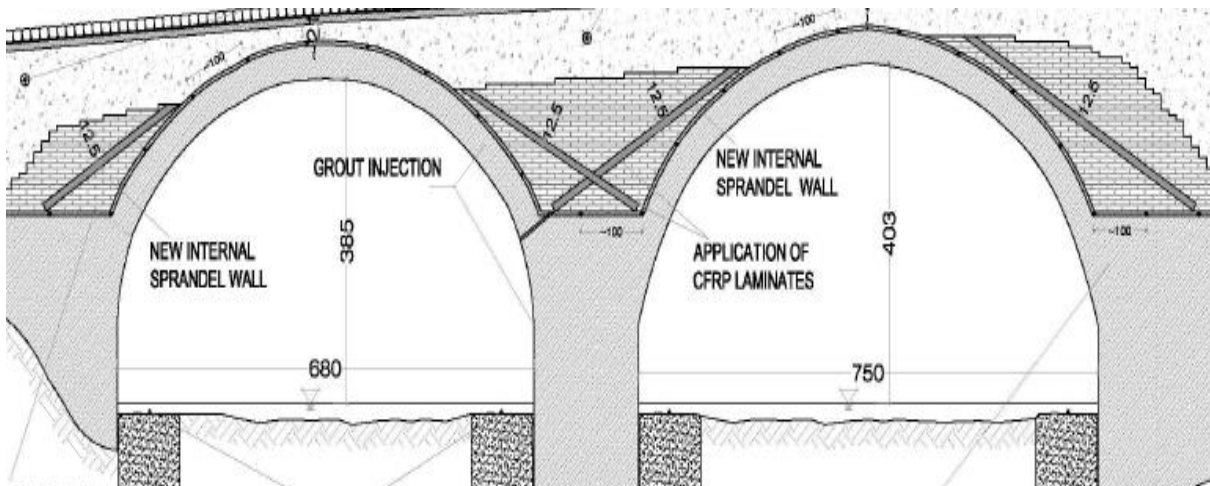
پس از آشنایی با تاریخچه ای از پل های قوسی سنگی، انواع بارهای وارد بر آنها، آسیب ها و خساراتی که در اثر اعمال این بارها در آنها ایجاد می شود در فصول ۱ و ۲، در فصل سوم با انواع روش های تحلیل و بازرسی این دسته از سازه ها آشنا شده و در فصل چهارم، تکنیک های مختلف مقاوم سازی و تعمیر خسارات رسیده به پل های قوسی سنگی اشاره گردید. حال در این فصل به مطالعه موردی یک پل قوسی سنگی تحت بارهای ثقلی به تنهایی و تحت بارهای ثقلی و زلزله به صورت همزمان پرداخته و نقش دو روش مقاوم سازی پل های قوسی سنگی یعنی استفاده از تسمه ها و ورق های فولادی متصل شده به طاق قوس در بهبود عملکرد این پل، تحت اثر این دو حالت بارگذاری بررسی می شود. جهت این تجزیه و تحلیل از مدل سازی عددی به روش اجزا محدود در نرم افزار SAP2000 استفاده شده است.

۵-۲- معرفی پل استفاده شده در مطالعه موردی

پل استفاده شده در این قسمت، پل Rio Moline نام دارد که در شمال ایتالیا واقع شده است. این پل در قرن ۱۸ میلادی ساخته شده و دارای دو دهانه به طول های مختلف است (شکل ۵-۱). دهانه سمت چپ به طول ۶/۸ متر و دهانه سمت راست به طول ۷/۵ متر می باشد. قوس پل از سنگ هایی با ضخامت های مختلف تشکیل شده است (ضخامت ۴۰ تا ۴۵ سانتیمتر). عرض پایه مرکزی پل برابر ۱/۷ متر می باشد. عرض جاده روی پل برابر ۴ متر است. با توجه به هندسه و مشخصات پل، سازه تحت اثر وزن خود و بار زنده قرار دارد. در سال ۲۰۱۲ میلادی Tecchio و همکاران [۴۸]، به بررسی رفتار پل در دو حالت بدون مقاوم سازی و با مقاوم سازی توسط ورق های FRP پرداختند. آنها جهت مطالعه خود از مدل سازی عددی در نرم افزار ABAQUS استفاده کرده و بار زنده وارده بر پل را معادل ۵ کیلونیوتن بر مترمربع لحاظ نمودند.



شکل ۵-۱- نمایی از پل Rio Moline واقع در کشور ایتالیا [۴۸]



شکل ۵-۲- مقطع طولی پل Rio Moline [۴۸]

۵-۲-۱- معرفی مشکلات پل

پل در شرایط بسیار بدی قرار داشت چنانکه برای محافظت و تخریب کلی پل بوسیله شمع های چوبی و کنترل توسط یکپارچه سازی با فولاد، بصورت موقت انجام شده بود. برای شناخت بهتر وضعیت پل و وضعیت لایه های داخلی پل که شامل لایه های بیرونی، درونی و پرکننده پل سوراخ های افقی و عمودی ایجاد کرده، بوسیله آندوسکپی سازه پل را شناسایی گردید. همچنین گرفتن نمونه از قسمت های مختلف برای شناخت بهتر پل انجام شده است.

سازه پل بدلیل ضعیف شدن و از بین رفتن ملات بین سنگ ها، خوردگی و سایدگی نقاط اتصال بین، باعث جدایی تعدادی از سنگ های سازه پل شده بود. سطوح داخلی پل بدلیل رشد و گسترش پوشش گیاهی دچار تخریب کلی شده است.

با توجه به بررسی انجام شده توسط سنگ طاق وجود ناپیوستگی و حفره که باعث کاهش مقاومت مصالح مصرفی همچنین تاثیر وارده از زمین بر روی پل باعث ضعف این قسمت شده است. دیوار و پایه اصلی پل از سنگ هایی با ضخامت ۴۵ تا ۵۵ سانتیمتر و لایه های داخلی با سنگ های خرد و ریز تشکیل شده اند.

۵-۲-۱-۱- مرمت اولیه

روش های مرمت اولیه باید طوری انتخاب شود تا سازه عملکردی منسجم و یکپارچه داشته باشد خصوصا در قسمت قوس پل تا برای ترافیک عبوری عملکرد بهتری داشته باشد. بسیاری از تکنیک های نوسازی با توجه به تاریخچه پل و ظرفیت تحمل بار توسط مصالح چه از نظر فیزیکی و چه از نظر شیمیایی با ساختار پل سازگار می باشد.

نوسازی اسپندزل پایه ها و دیوار های پل با استفاده از تکنیک های سنتی زیر صورت گرفته است:

- ملات پایه آهکی (با توجه به وجود حفره در سازه های بنایی بسیار مناسب است) میان تخلخل ها تزریق می شود.
- ساخت مجدد قسمت های تخریب شده سازه، مرحله ای که برای ساخت سایر قسمت ها مورد نیاز است به شرح زیر می باشد:

۱- برداشتن سطح بالایی پل (نصب شمع بصورت موقت در زیر پل ضروری است)

۲- از بین بردن و تمیز کردن ضایعات و ملات های ضعیف با هوای فشرده

۳- تزریق گروت به درون حفره ها بوسیله لوله های خاص (جاهایی که دسترسی کمی دارند)

۴- قرار دادن لوله ها با فاصله ۴۰ سانتیمتر از موقعیت اصلی (در داخل و خارج از پل) و نهایتا تزریق ملات

۵- ساخت مجدد دیوار های خراب شده و سوراخ شده

۶- دوختن دیوارها بوسیله میلگرد جهت ایجاد یکپارچگی بهتر

- با توجه به اینکه پایه پل خسارت جدی ندیده است نیازی به روش های خاص برای تقویت پایه پل دیده نمی شود لذا مشکلات کوچکی همچون مسائلی که قبلا بیان شده است با روش های اتخاذ شده قابل حل است.

۵-۲-۱-۲- بهسازی لرزه ای پل

با فرض حل شدن مشکلات اولیه پل و یکپارچه ساختن آن حال باید در برابر بارهای لرزه ای مقاوم سازی شود. به جهت تعمیر و مقاوم سازی برای بار زلزله سازه توسط چهار روش با یکدیگر مقایسه می شوند و بهترین آن ها تحت بار زلزله کوبه و الاسترو نیز قرار می گیرند. اشاره ای کوتاه جهت آشنایی اولیه با روش های اتخاذ شده ارائه می شود.

روش اول استفاده از دیوار جانبی و چهار لایه FRP است که توسط مقاله مورد مطالعه انجام شده است و نتایج نیز با توجه به مطالعه مورد نظر استخراج خواهد شد. اشاره شد که دیوار جانبی با میلگرد ۱۶ به سازه اصلی پل دوخته شده است.

روش دوم استفاده از تسمه های فولادی می باشد برای اینکه مقایسه دقیق تر و بهتری وجود داشته باشد از سه و پنج تسمه فولادی استفاده می شود تا تاثیر موضعی آن ها و اینکه چه تعدادی مناسب می باشد به درستی مشخص شود. ضمن اینکه تنها روش استفاده شده در راه آهن ایران می باشد، لذا این روش نیز تحت اثر زلزله قرار خواهد گرفت.

روش سوم استفاده از صفحه های فولادی در زیر پل می باشد برای مقایسه هر چه بهتر از صفحه های فولادی به ضخامت های ۱ و ۲ سانتی متر استفاده می شود تا تاثیر ضخامت ورق بر روی سازه بدرستی مشخص شود.

روش چهارم استفاده از ستون های فولادی در زیر پل می باشد که برای اتصال بهتر از ورق ۱ سانتی متر نیز در زیر قوس استفاده می شود. برای بررسی بهتر دو ستون استفاده شده در زیر قوس ها با فواصل مختلف از زیر قوس پل استفاده می شود تا مشخص گردد میزان فاصله از پایه های پل و همچنین مرکز قوس چه تاثیری در مقاوم سازی پل دارد.

در کلیه روش های فوق سعی بر حفظ باستانی بودن و جلوه ظاهری پل شده است علاوه بر اینکه در روش ستون فولادی چنانچه در کنار پایه های پل قرار گیرد ظاهر زیاد تحت تاثیر قرار نخواهد گرفت. نکته مهم در ارائه این روش ها این است که تنش های سازه به حداقل خود برسند تا در شرایط زلزله بهترین عملکرد را داشته باشند. به همین دلیل برای شناسایی روش های مناسب، سازه را تحت اثر بار ثقیلی قرار می دهیم پس از مشخص شدن سازه ای که کمترین تنش و تغییر مکان را دارند به عنوان تست برای زلزله کوبه و الاسترو و نهایتا بوسیله بار قطار بررسی و تحلیل خواهد شد.

۵-۳- صحت سنجی عملیات مدل سازی

همانطور که در مقدمه این فصل اشاره شد، جهت تحلیل و بررسی پل مزبور از مدل سازی در نرم افزار SAP2000 استفاده شده است. بدین منظور در این قسمت ضمن ارائه خلاصه ای از روند انجام شده جهت مدل سازی این پل در نرم افزار SAP، مدل مزبور را تحت بارگذاری مشابه آنچه Tecchio و همکاران [۴۸] در نظر گرفته اند، قرار داده و نتایج بدست آمده از این دو تحلیل را با یکدیگر مقایسه کرده تا معیاری از درستی روند مدل سازی انجام شده بدست آید.

۵-۳-۱- روند مدل سازی پل در نرم افزار SAP2000

جهت مدل سازی در برنامه SAP اولین گام تعریف مشخصات مصالح سنگی استفاده شده در ساخت پل است. با توجه به مشخصات ارائه شده در گزارش مطالعه انجام شده بر روی پل، مصالح استفاده شده در این پل دارای مقاومت فشاری در حد ۲ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲۲ می باشند. سایر مشخصات مصالح که در نرم افزار SAP تعریف شده است در شکل ۵-۳ نشان داده شده است. رفتار مصالح به صورت خطی در نرم افزار لحاظ شده است.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: MAT [Color Selection]

Material Type: Concrete [Dropdown]

Material Notes: [Text Area] [Modify/Show Notes...]

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 15651.7

Mass per Unit Volume: 1596.0292

Units

Units: N, m, C [Dropdown]

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 1.200E+10

Poisson's Ratio, U: 0.22

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 4.918E+09

Other Properties for Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 2000000

☐ Lightweight Concrete

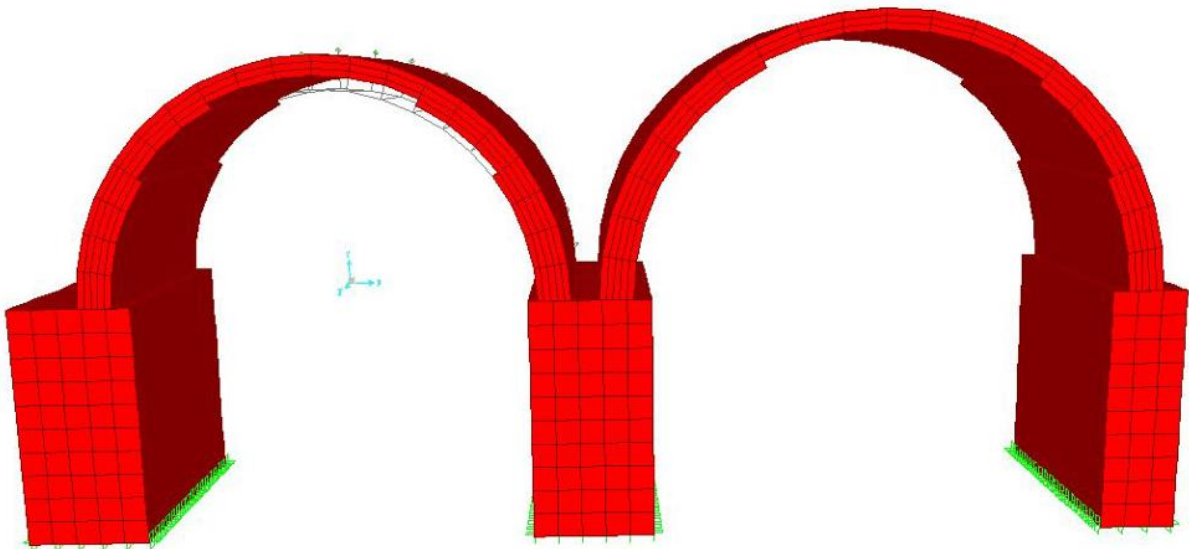
Shear Strength Reduction Factor: [Text Field]

☐ Switch To Advanced Property Display

[OK] [Cancel]

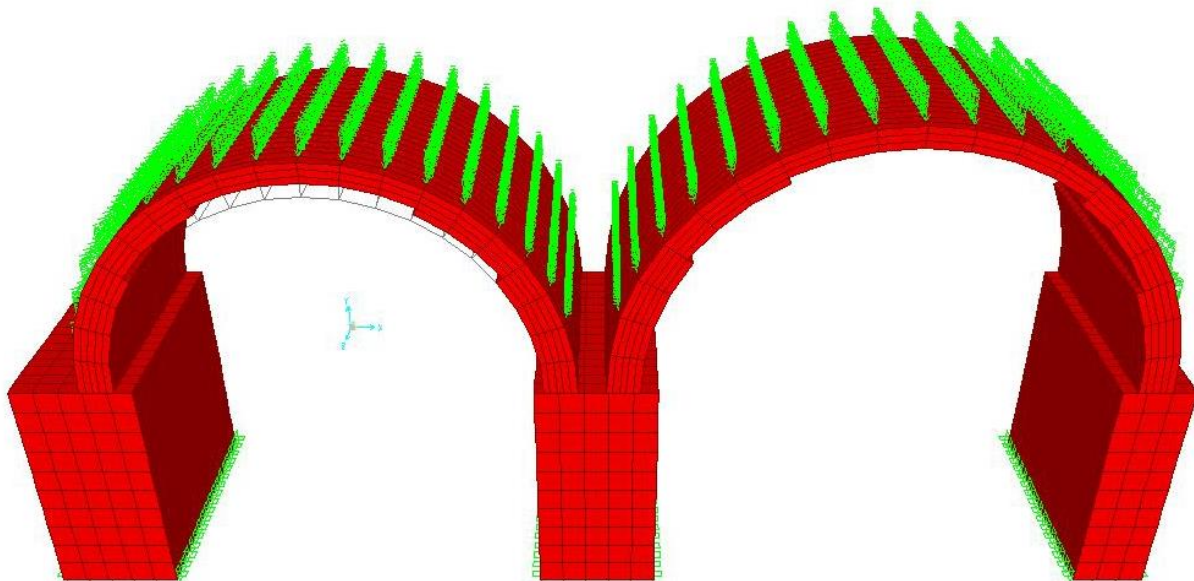
شکل ۵-۳- مشخصات مصالح تعریف شده در برنامه SAP2000

جهت ساخت قطعات تشکیل دهنده پل شامل قوس ها و پایه های پل سنگی در برنامه SAP روشهای مختلفی از سوی محققان مختلف پیشنهاد شده است. در این تحقیق برای ساخت قطعات پل از المانهای Solid استفاده شده است و اندرکنش تماسی به گونه ای که لغزش بین قطعات بلوک های Solid مجاور هم رخ ندهد تعریف گردید. قسمت کف پایه های پل گیردار فرض شده و در نتیجه تمام درجات آزادی گره های این قسمت مقید شده اند (شکل ۵-۴).



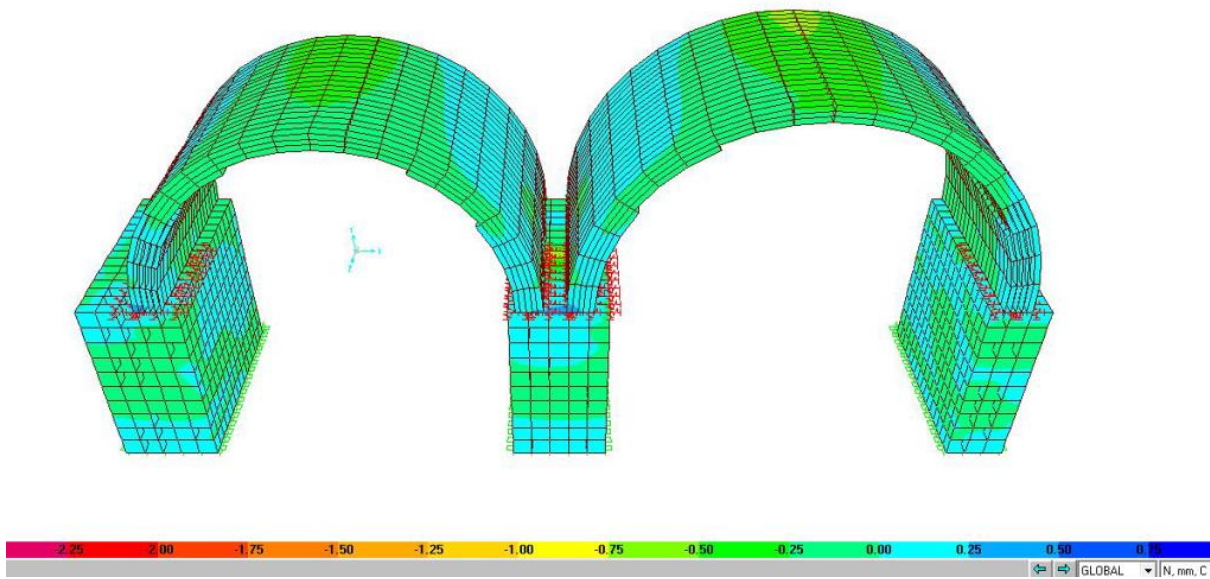
شکل ۵-۴- نمایش از مدل ساخته شده از پل Rio Moline در برنامه SAP2000 با استفاده از المان های Solid

بارگذاری وارد بر پل معادل همان بارگذاری لحاظ شده در مطالعه Tecchio و همکاران [۴۸] بوده که به صورت گرهی و براساس سطح بارگیر بلوک ها، در سطح قوس اعمال شده است (شکل ۵-۵).



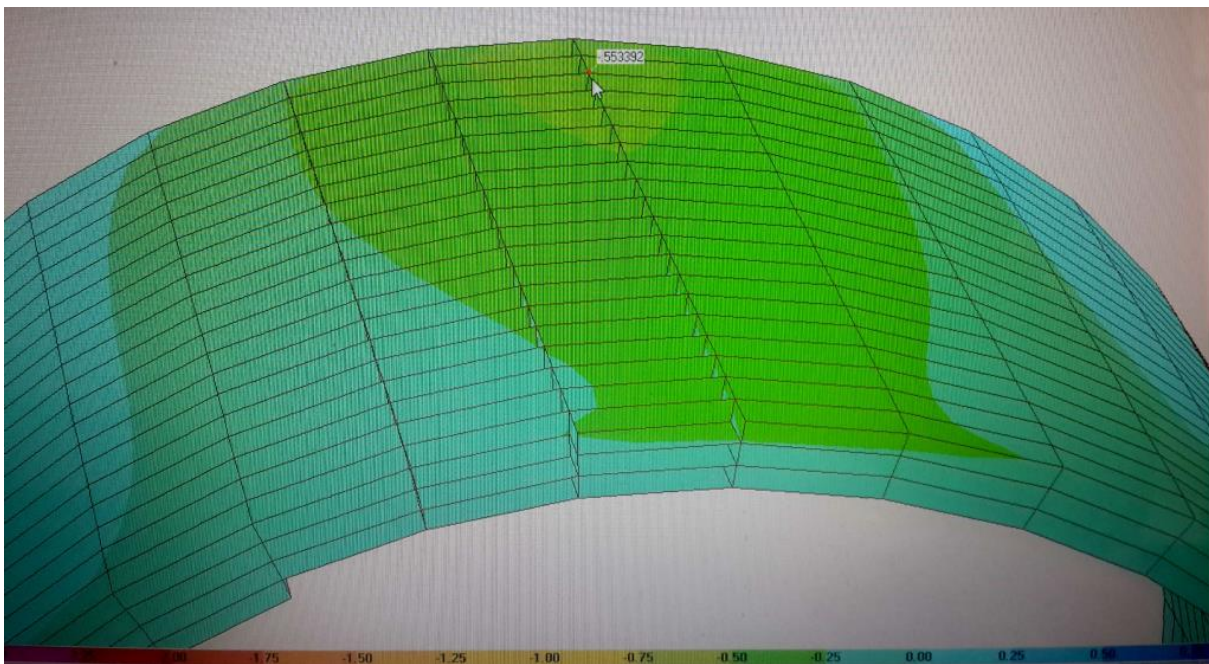
شکل ۵-۵- نحوه اعمال بار زنده گسترده معادل ۵ کیلونیوتن بر مترمربع بر سطح کل قوس

پس از تکمیل مراحل مدل سازی و آماده شدن مدل، نوبت به مرحله تحلیل مدل و سپس مرحله قرائت نتایج بدست آمده از تحلیل مدل می رسد. در شکل ۵-۶ نحوه توزیع تنش در سطح مدل پل به صورت کنٹوری و بر حسب واحد مگاپاسکال نشان داده شده است.

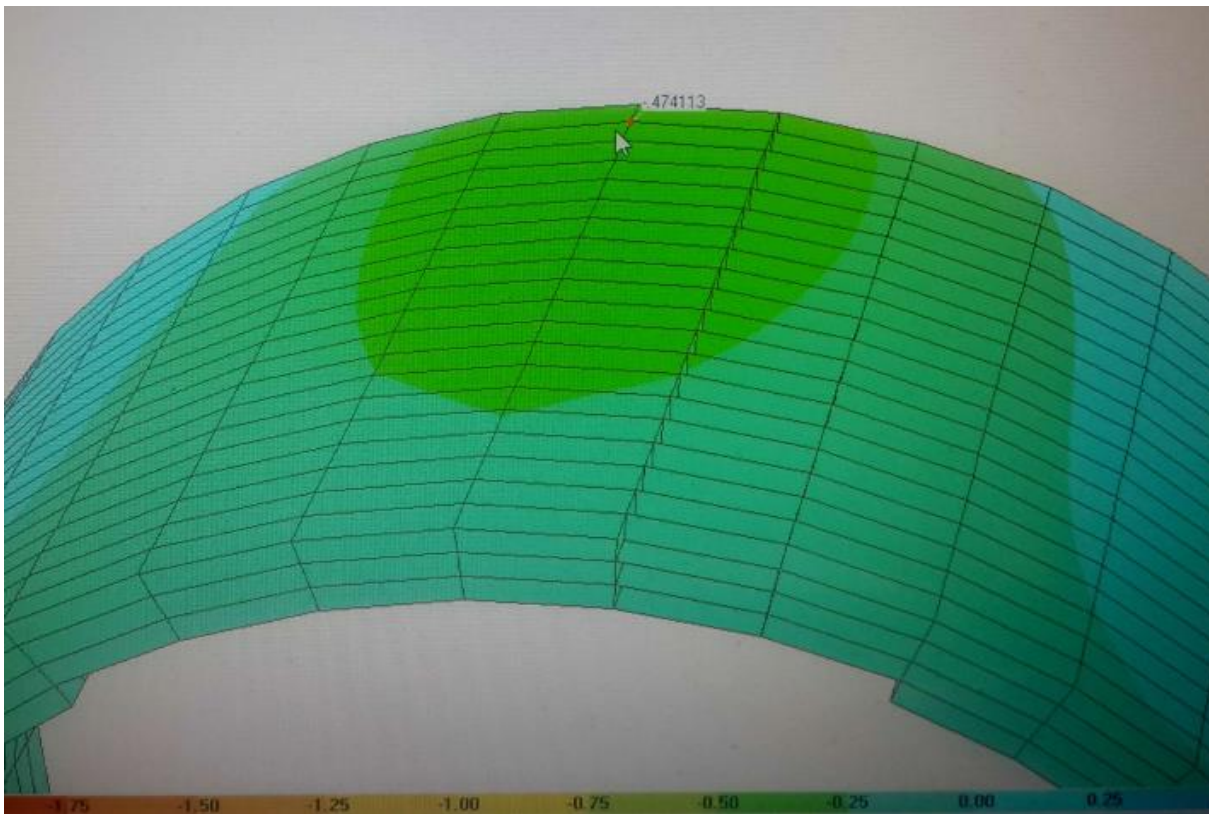


شکل ۵-۶- چگونگی توزیع تنش ایجاد شده در پل به صورت کنئوری برحسب مگاپاسکال

همانطور که در شکل ۵-۶ مشاهده می شود ماکزیمم تنش ایجاد شده در قسمت مرکزی دهانه های قوس می باشد. مقادیر ماکزیمم تنش ایجاد شده در قسمت مرکزی دهانه قوس های سمت راست و چپ این پل در شکل های ۵-۷ و ۵-۸ نشان داده شده است. ماکزیمم تنش در قوس سمت راست ۰,۵۵۳ و در قوس سمت چپ ۰,۴۷۴ مگاپاسکال می باشد.

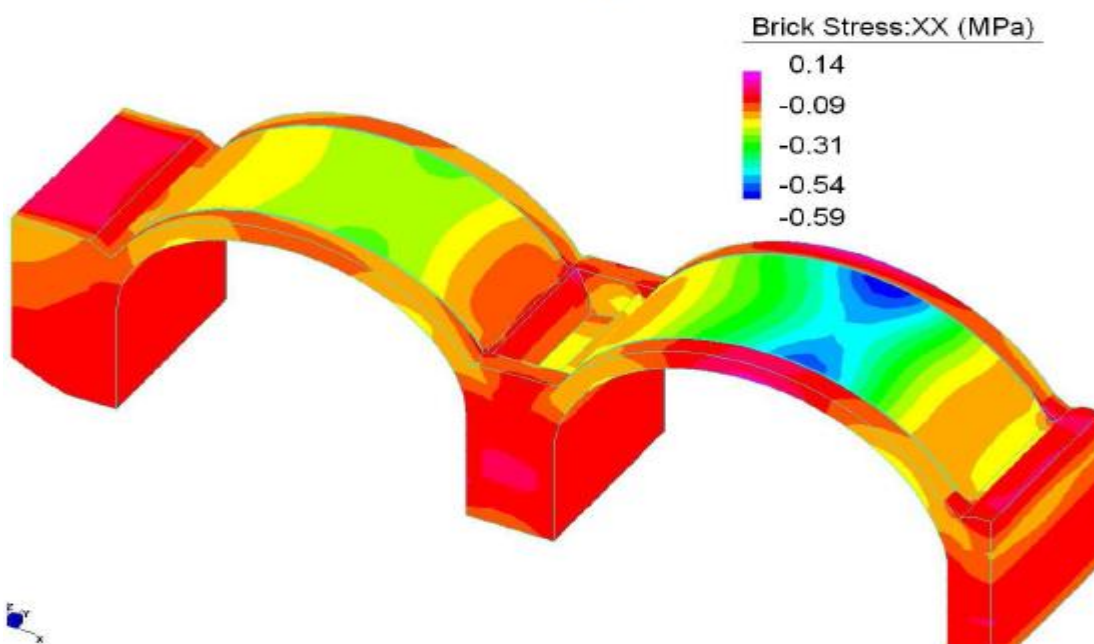


شکل ۵-۷- مقدار و محل ماکزیمم تنش ایجاد شده در قوس سمت راست پل (مقدار تنش برحسب مگاپاسکال)



شکل ۵-۸- مقدار و محل ماکزیمم تنش ایجاد شده در قوس سمت چپ پل (مقدار تنش برحسب مگاپاسکال)

در شکل ۵-۹ نحوه توزیع تنش ایجاد شده در مدل پل Rio Moline، ساخته شده در نرم افزار ABAQUS توسط Tecchio و همکاران [۴۸]، برحسب مگاپاسکال نشان داده شده است.



شکل ۵-۹- نحوه توزیع تنش در مدل ساخته شده توسط Tecchio و همکاران [۴۸] برحسب مگاپاسکال

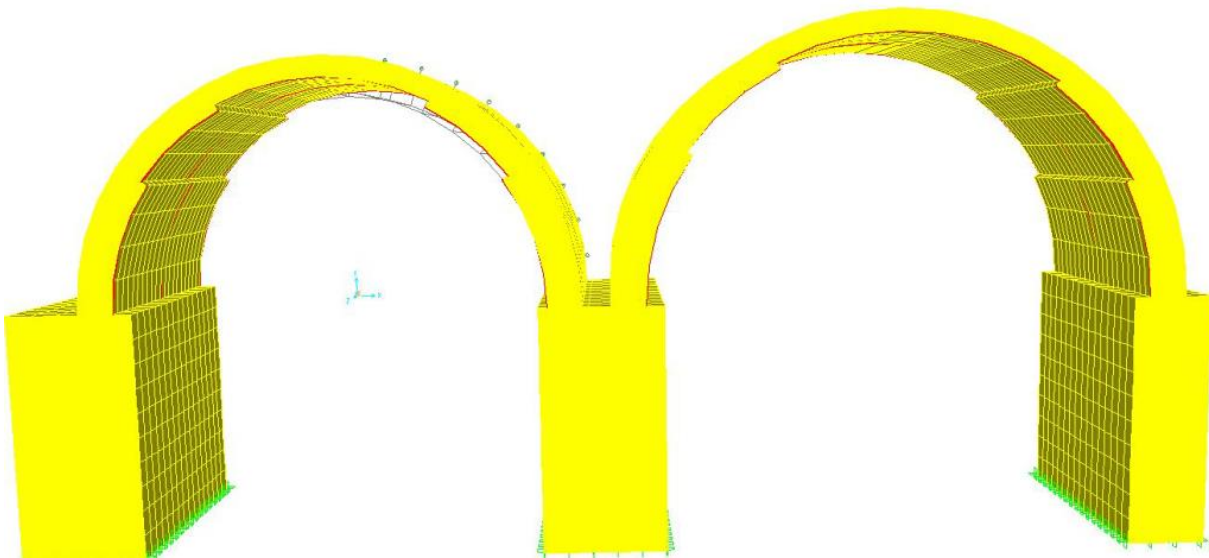
همانطور که در شکل بالا و از مقایسه نحوه توزیع تنش در قوس های این مدل با توزیع تنش در قوس های مدل ساخته شده در نرم افزار SAP2000 مشاهده می شود، دو توزیع تنش رفتار مشابهی را بیان می کنند بطوریکه در هر دو مدل مقادیر تنش ایجاد شده در قوس از مقدار کم در گوشه شروع شده و به تدریج زیاد شده تا به ماکزیمم مقدار خود در قسمت مرکزی دهانه قوس می رسد. مطابق گزارش ارائه شده توسط Tecchio و همکاران ماکزیمم تنش ایجاد شده در قوس های مدل در قوس سمت راست اتفاق افتاده و مقدار آن نیز ۵۹/۰ مگاپاسکال است که این مقدار با مقدار ماکزیمم بدست آمده از برنامه SAP که ۵۳/۰ مگاپاسکال بود، بسیار نزدیک بوده که این امر نشان دهنده صحت روند مدل سازی انجام شده می باشد.

۵-۴- مقاوم سازی پل

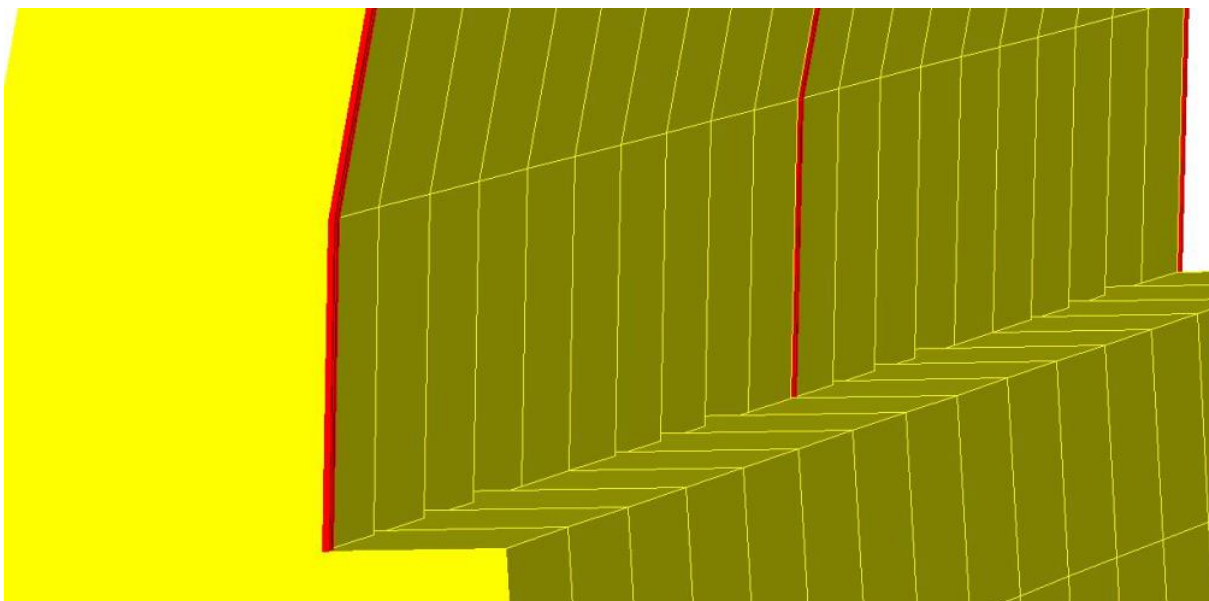
در انتهای فصل چهارم با انواع مختلفی از روش های مقاوم سازی پل های قوسی ساخته شده از مصالح بنایی آشنا شدیم. از جمله این روش ها استفاده از تسمه ها و میلگردهای قرار گرفته در فواصل معین در زیر طاق قوس که با ملات یا چسب اپوکسی به دیواره قوس به صورت کامل متصل شده اند، استفاده از ورق های فولادی که بر سطح داخلی قوس متصل شده و کل سطح زیر طاق قوس را پوشانده و یا استفاده از ورق های FRP می باشد. نتایج بهبود رفتار مشاهده شده در اثر استفاده از ورق های FRP توسط Tecchio و همکاران، و با استفاده از نتایج بدست آمده از تحلیل مدل عددی ساخته شده در نرم افزار ABAQUS دسترس می باشد. به منظور انجام مقایسه ای بین این چهار روش مقاوم سازی، در این تحقیق مدل هایی نظیر دو روش مقاوم سازی دیگر (استفاده از میلگردها و ورق فولادی متصل شده به قوس) و استفاده از ستون فولادی در نرم افزار SAP2000 ایجاد شده، سپس مدل ها تحت همان بارگذاری اولیه ثقیلی (مشابه بارگذاری توضیح داده شده در قسمت صحت سنجی) در محیط این نرم افزار تحلیل شده و نتایج تنش های توزیع شده در سطح پل قوسی بررسی و با نتایج تنش های حالت اولیه و حالت مقاوم سازی شده با ورق های FRP مقایسه می شود.

در شکل های ۵-۱۰ تا ۵-۱۳ مدل نظیر این سه حالت مقاوم سازی در نرم افزار SAP2000 نشان داده شده است. کلیه شرایط این مدل مشابه مدل استفاده شده در قسمت صحت سنجی بوده با این تفاوت که المان های فولادی به مدل مزبور اضافه شده است. در حالت مدل تقویت شده با تسمه های فولادی از تسمه هایی به مساحت مقطع ۲ سانتیمترمربع که در امتداد Z مدل (عرض قوس) و در سه مقطع ابتدا، وسط و انتها با فواصل ۲ متری از هم قرار گرفته اند و فرض شده که با تمهیداتی نظیر استفاده از گروت و چسب های اپوکسی کاملاً به جداره قوس متصل شده اند. از طرفی از همین مقطع در همین جهت این بار بوسیله ۵ مقطع فولادی به فاصله ۱ متر از یکدیگر مورد آزمایش قرار گرفته است تا روش مناسب تر برای بارهای لرزه ای مورد استفاده قرار گیرد.

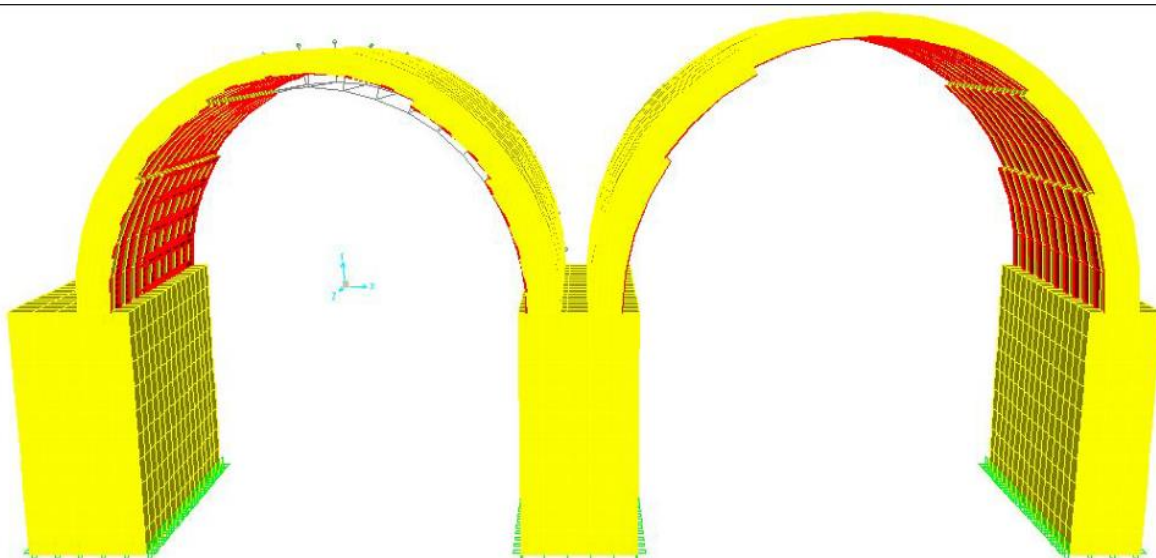
در مدل قوس تقویت شده با ورق فولادی، از ورقی به ضخامت ۱ و ۲ سانتیمتر استفاده شده است. مشخصات فولاد مصرفی در ساخت ورق ها و تسمه ها، همان مشخصات فولاد ST37 بوده که فولادی با مدول یانگ ۲۰۰ گیگاپاسکال و تنش تسلیم ۲۴۰ کیلوگرم برسانتیمتر مربع با ضریب پواسون ۰/۳ می باشد. در ساخت المانهای فولادی هم از حالت Solid استفاده شده است.



شکل ۵-۱۰- تقویت قوس پل با استفاده از سه ردیف تسمه فولادی به مساحت 2cm^2 متصل شده به قسمت زیر قوس

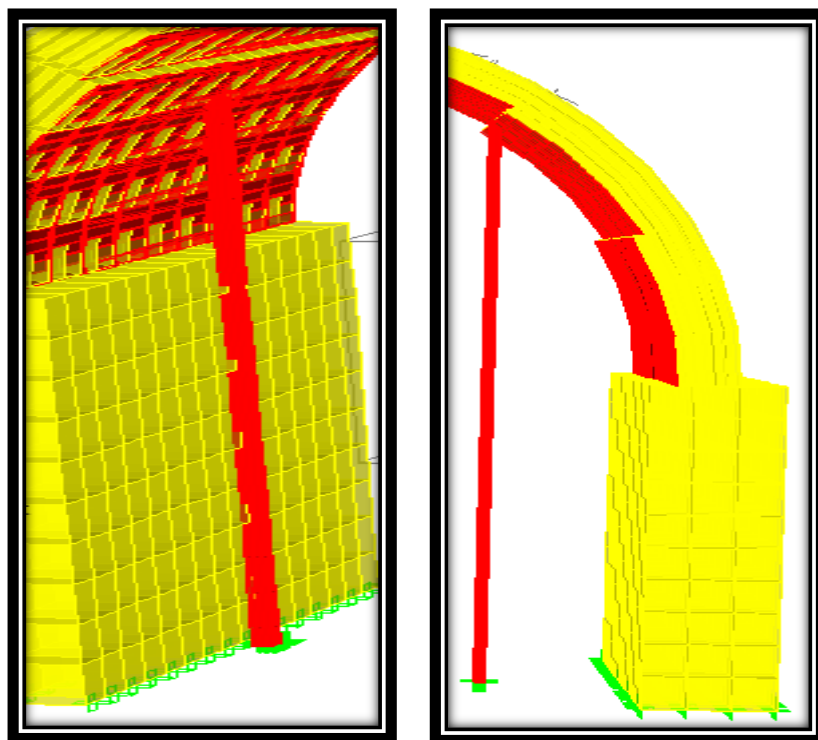


شکل ۵-۱۱- محل قرار گیری تسمه های فولادی در سه مقطع اول، وسط و انتهای عرض پل به طول ۴ متر می باشد.



شکل ۵-۱۲- استفاده از ورق های فولادی به ضخامت ۲ سانتیمتر در کل سطح قوس

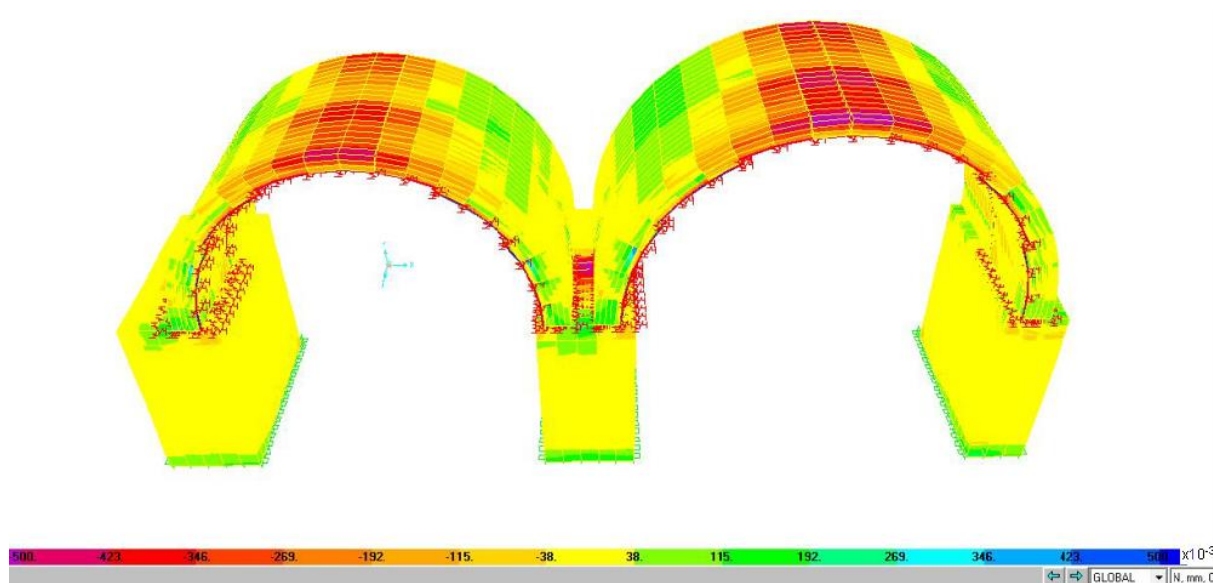
روشی دیگر استفاده از ستون های فولادی این ستون ها بوسیله ورق به ضخامت ۱ سانتیمتر به قوس متصل شده است مقطع ستون های فولادی ۱۰۰ سانتیمتر مربع می باشد. ستون در قوس سمت چپ به فاصله ۵ سانتیمتر از پایه پل (تقریباً چسبیده به پایه) قرار گرفته شده است و در قوس سمت راست به فاصله ۱,۲ متر از پایه پل قرار داده شده است تا تفاوت در محل قرار گیری پل مشخص شود.



شکل ۵-۱۳- محل قرارگیری ستون در قوس های سمت چپ و راست

۵-۴-۱- نتایج تحلیل مدل های مقاوم سازی شده

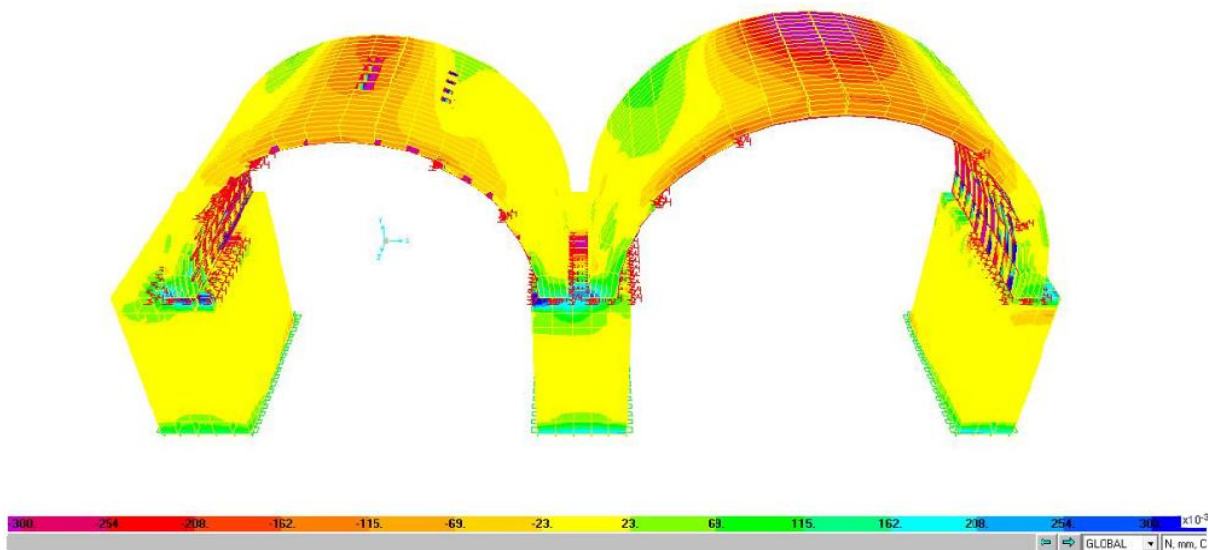
پس از ساخت مدل ها و تعریف المان های فولادی و وابسته نمودن آنها به جداره پل، مدل های تحلیل شده که در ادامه، نحوه توزیع تنش ایجاد شده در هر مدل به صورت کنتوری و برحسب مگاپاسکال آورده شده است.



شکل ۵-۱۴- توزیع تنش برحسب مگاپاسکال در سطح مدل پل مقاوم سازی شده توسط سه تسمه فولادی

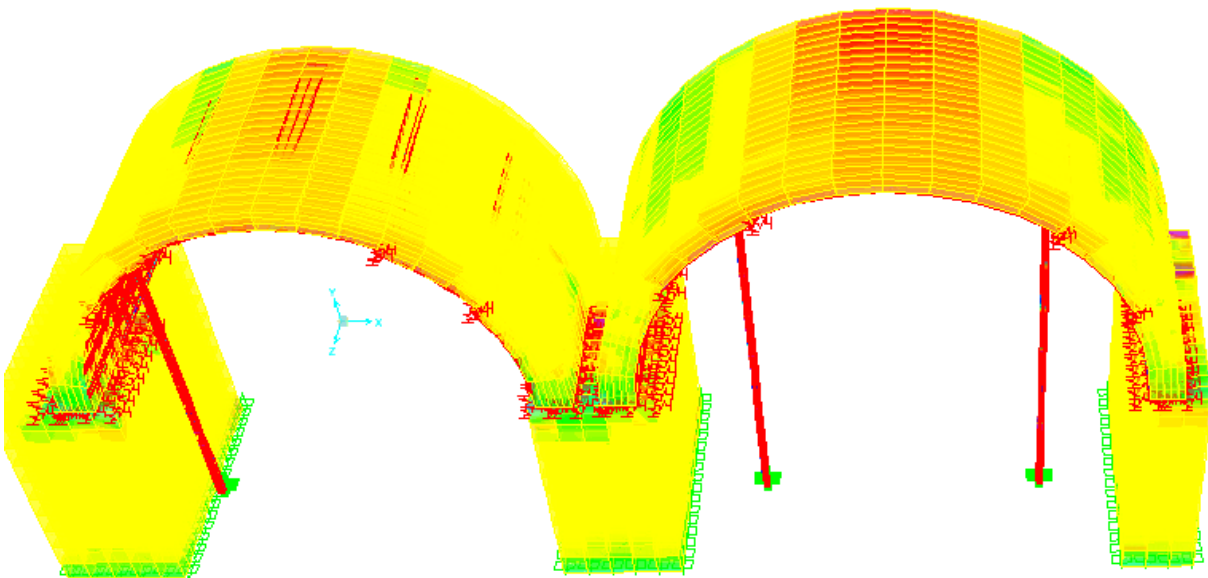
همانطور که از شکل بالا مشاهده می شود با استفاده از این روش مقاوم سازی، توزیع تنش در سطح قوس ها حالت یکنواخت تری پیدا کرده و ماکزیمم تنش در سطح قوس سمت چپ از مقدار $0/553$ مگاپاسکال در حالت اولیه و بدون مقاوم سازی به مقداری بین $0/423$ تا $0/5$ مگاپاسکال تقلیل می یابد.

در شکل ۵-۱۵ نحوه توزیع تنش در مدل تقویت شده توسط ورق فولادی نشان داده شده است. بر اساس این شکل در می یابیم که استفاده از ورق فولادی به شدت، مقدار تنش های ایجاد شده در سطح قوس را کاهش داده به طوریکه مقدار ماکزیمم تنش در سطح قوس سمت چپ در حدود $0/3$ مگاپاسکال می باشد و در قوس سمت چپ مقادیر تنش هایی به مراتب کوچکتر ایجاد شده (در محدوده $0/12$ تا $0/16$ مگاپاسکال) و توزیع تنش در سطح قوس حالت قرینه دارد.



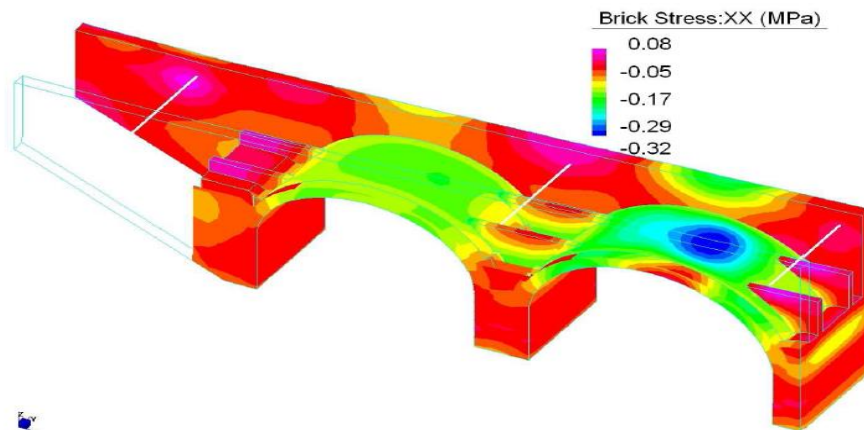
شکل ۵-۱۵- توزیع تنش برحسب مگاپاسکال در سطح مدل پل مقاوم سازی شده توسط ورق فولادی

در شکل ۵-۱۶ پل بوسیله ستون با ابعاد مقطع ۱۰۰ سانتی متر مربع و ورق فولادی به ضخامت ۱ سانتی متر تقویت شده است همانطور که در شکل ملاحظه می شود بیشترین میزان تنش در قوس سمت راست در حدود ۰/۳ و در قوس سمت چپ ۰/۱۵ مگاپاسکال می باشد.



شکل ۵-۱۶- نحوه توزیع تنش در پل مدلسازی شده بوسیله پل مقاوم سازی شده با ستون و ورق فولادی

در شکل ۵-۱۷ نحوه توزیع تنش در سطح مدل پل مزبور که توسط دیواره کناری و ورق های FRP تقویت شده است بر اساس تحقیقات Tecchio و همکاران [۴۸] ، نشان داده شده است. بنابر گزارش ارائه شده در این تحقیق استفاده از ورق های FRP سبب شده ماکزیمم تنش ایجاد شده در سطح قوس به مقدار ۰/۳۹ مگاپاسکال برسد. بنابراین استفاده از ورق فولادی سبب کاهش تنش بیشتری می شود.



شکل ۵-۱۷- توزیع تنش در مدل پل مقاوم سازی شده با ورق های FRP [۴۸]

ذیلا اشاره ای به مزایا و معایب FRP می شود اما نتایج و بررسی بیشتر با توجه به اینکه در پایان نامه مهندس تقی زاده که در دانشگاه تفرش انجام شده، قابل مشاهده است ارجاع می شود.

مزایا:

۱- بدلیل تشکیل الیاف FRP از کربن، شیشه و آرامید مقاومتی تا مقدار ۳۰۰۰ مگاپاسکال دارند تا جایی که می توان گفت در بعضی موارد این مقدار حتی از فولاد پیش کشیده نیز بیشتر می باشد.

۲- سختی این الیاف بسیار زیاد است تا جایی که می توان برابر با آلومینیوم و در کمترین حالت برابر با فولاد در نظر گرفت.

۳- وزن بسیار کم آن ها باعث می شود سازه بار مضاعفی تحمل نکند و همچنین از نظر اجرایی نسبت به فولاد با توجه به وزن پایین بسیار آسان تر می باشد.

۴- مواد استفاده شده در آن ها مغناطیسی نیستند و از مواد خطرناک ساخته نشده اند.

۵- دوام آن ها در برابر محیطی که کلر بسیار دارد تاثیری بر روی الیاف FRP ندارد و همچنین مانند فولاد زنگ نمی زند.

معایب:

۱- هزینه و قیمت: این نوع الیاف بدلیل جدید بودن، وارداتی بودن و نیاز به نیروی متخصص برای اجرا، نیازمند هزینه های بسیار زیادی هستند ضمن اینکه در سازه های با رفت و آمد بالا به استفاده بیش از یک لایه نیاز دارند.

۲- میزان کرنش این الیاف با کرنش بتن و فولاد تفاوت زیادی دارد لذا برای استفاده از آن باید دقت فراوانی کرد چون تغییر شکل متفاوتی با این دو ماده دارد، حال آنکه در مصالح بنایی فاکتور تغییر شکل و خزش را نمیتوان به درستی پیش بینی و بررسی کرد نهایتا این ناهماهنگی در تغییر شکل برای سازه مشکل ایجاد خواهد کرد.

۳- شکندگی: بر خلاف فولاد، FRP از الیاف شکننده ای تشکیل شده اند در واقع با اینکه کرنش زیادی دارند اما مانند فولاد تا حد سخت شدگی نهایی نیستند و این باعث ایجاد ترد شکنی در الیاف آن و نهایتاً گسیختگی خواهد شد.

۴- مهار و چسبندگی: نکته مهم در نصب و استفاده از آن ها بدرستی چسبیدنشان به سایر قسمت های سازه می باشد ضمن اینکه چنانچه چسب مورد استفاده بیش از اندازه قوی باشد باعث می شود بار بیش از حد به الیاف وارد شود و برعکس چنانچه از چسب ضعیف استفاده شود بار کمتری به الیاف وارد می شود.

۵- دوام: شیشه و آرامید از مواد اصلی تشکیل دهنده الیاف FRP چنانچه در یک محیط قلیایی قرار گیرند منجر به شکستن پیوندهای بین مولکولی ساختارشان می شود.

۶- خزش و تنش گسیختگی: یک از مشکلات الیاف FRP تغییر شکل به همراه تغییر شکل کلی و جزئی سازه می باشد که این مشکل باعث می شود تنش گسیختگی زودتر اتفاق بیفتد.

۷- با توجه به اینکه الیاف FRP جدید هستند اما تا کنون زلزله خطرناکی اتفاق نیفتاده تا نتایج و مشاهدات عملی از میزان توانایی های آن وجود داشته باشد.

۵-۴-۲- انتخاب روش های مقاوم سازی لرزه ای

در جدول ۵-۱ میزان تنش ها بر حسب مگاپاسکال و میزان جابه جایی ها بر حسب میلیمتر می باشد. با توجه به روش های بیان شده و با توجه به نکات زیر روش های مقاوم سازی در برابر زلزله مشخص می شود.

- میزان تنش و جا به جایی ها در حالت استفاده از تسمه های فولادی با استفاده از ۳ و ۵ تسمه تفاوت زیادی ندارد.
- استفاده از ورق فولادی به ضخامت ۱ سانتیمتر تنش هایی در نزدیکی تنش های بوجود آمده در مدلی که با استفاده از الیاف FRP و دیوار تقویتی تقریباً یکسان می باشد. لذا بنظر می رسد استفاده از ورق فولادی به ضخامت ۲ سانتی متر موثرتر باشد.
- یکی دیگر از مسائل مهم در انتخاب روش بهسازی موارد اقتصادی می باشد که در فصل بعد مورد بررسی خواهد گرفت.

جدول ۵-۱- ماکزیمم تنش و تغییر مکان در پل

تغییر مکان و تنش ماکزیمم	قوس سمت چپ		قوس سمت راست	
	تنش	جابه جایی	تنش	جابه جایی
الیاف FRP	۰/۲	-	۰/۳۹	-
ستون فولادی	۰/۲	۰/۵۷	۰/۴	۱
۳ تسمه فولادی	۰/۴۴	۰/۹۴	۰/۵۵	۱/۱
۵ تسمه فولادی	۰/۳۶	۰/۸۹	۰/۴۵	۱/۱۶
صفحه فولادی ضخامت ۱ سانتیمتر	۰/۱۹	۰/۶	۰/۳۹	۱/۴۷
صفحه فولادی ضخامت ۲ سانتیمتر	۰/۱۶	۰/۵۸	۰/۳۶	۱/۱۲

ذکر این نکته ضروری است که در قسمت های مختلف ماکزیمم تنش در اکثر نقاط پل بیان شده که بسیار کمتر از مقادیر جدول ۵-۱ می باشد. در واقع این تنش ها در نقاط لبه پل می باشد و در مرکز قوس و سایر نقاط شاهد تنش و تغییر مکان های کمتری هستیم. میزان ماکزیمم تنش و تغییر مکان در مرکز قوس همانطور که در جدول ۵-۲ ملاحظه می کنید بسیار کمتر است.

جدول ۵-۲- ماکزیمم تنش و تغییر مکان در مرکز دهانه پل

تغییر مکان و تنش ماکزیمم	قوس سمت چپ		قوس سمت راست	
	تنش	جابجایی	تنش	جابجایی
الیاف FRP	۰/۲	-	۰/۳۹	-
ستون فولادی	۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۳	۰/۴۷
۳ تسمه فولادی	۰/۳۷	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۶
۵ تسمه فولادی	۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۳۵	۰/۶۵
صفحه فولادی ضخامت ۱ سانتیمتر	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۵۱
صفحه فولادی ضخامت ۲ سانتیمتر	۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۳	۰/۶

با توجه به نکات و مسائل ذکر شده و با توجه به جدول های ۵-۱ و ۵-۲ برای روش های بهسازی لرزه ای از دو روش استفاده از ۳ تسمه فولادی و ورق فولادی به ضخامت ۲ سانتی متر استفاده خواهد شد.

۵-۵- تحلیل لرزه ای پل ها

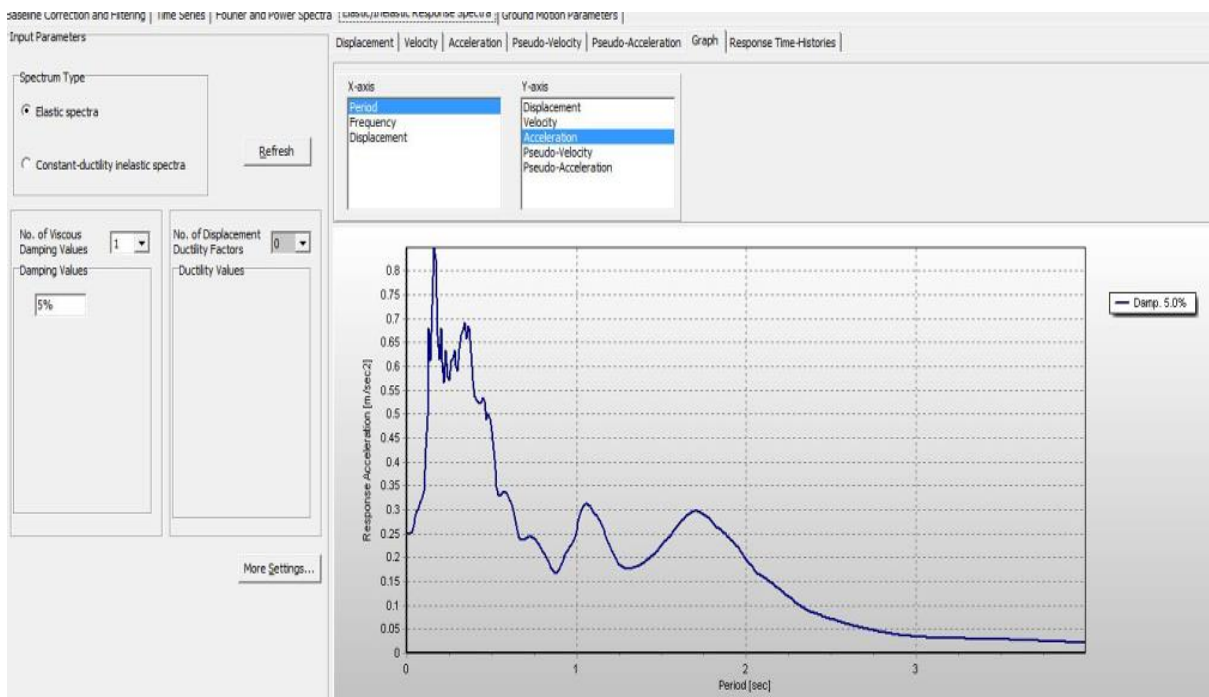
۵-۵-۱- مقدمه

یکی از بارهایی که می تواند اثرات ویرانگری بر روی پایداری پل های ساخته شده از مصالح بنایی داشته باشد، اثرات وقوع زلزله بر این پل ها بوده که می تواند باعث فروریزی کلی ساختمان پل گردد. بنابراین در این قسمت به منظور بررسی میزان اثر بخشی روش های مقاوم سازی استفاده شده در این پایان نامه بر روی مقاومت لرزه ای سازه، پل معرفی شده در قسمت قبل را با استفاده از تحلیل طیفی شتابنگاشتی و براساس شتابنگاشت ثبت شده از زلزله کوبه و السنترو، در دو حالت بدون مقاوم سازی و با استفاده از مقاوم سازی به سه روش اضافه کردن تسمه، ورق های فولادی و ستون به همراه ورق فولادی تحلیل کرده و نتایج توزیع تنش ایجاد شده در سطح هر یک از مدل ها استخراج می گردد.

علت انتخاب دو زلزله کوبه و السنترو به این دلیل می باشد که این دو زلزله تقریباً جزء شدید ترین زلزله ها هستند و بزرگی به ترتیب برابر با ۷/۳ و ۷/۲ ریشتر دارند، همچنین ژرفایی برابر با ۱۶ کیلومتر در هر دو زلزله ثبت شده است اما در پل محل مورد مطالعه تنها زلزله ای در حدود ۶ ریشتر گزارش شده است. نکته مهم اینکه در زلزله کوبه اشاره به خرابی شدید پل و انواع سازه ها شده است (در واقع در گزارشات پل را بصورت اختصاصی بیان کرده اند) که خود نشان از اهمیت این زلزله دارد. در بسیاری از مقالات و تحقیقات از زلزله کوبه استفاده میشود. بنظر می رسد استفاده از این دو زلزله منطقی تر از سایر زلزله های موجود باشد.

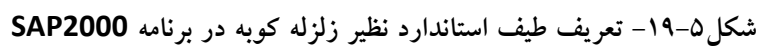
۵-۲- تحلیل طیفی و الزامات آن در برنامه SAP2000

تحلیل طیفی (تحلیل دینامیکی خطی) تحلیلی است که با فرض رفتار خطی مصالح سازه و با استفاده از پاسخ مودهای نوسانی سازه که در بازتاب کل سازه اثر قابل توجهی دارند انجام میگیرد. در این تحلیل از روش های آماری نظیر ترکیب مربعی CQC و جذر مجموع مربعات SRSS برای تخمین حداکثر پاسخ در مودهای مختلف استفاده می شود. اساس این روش بر مبنای معرفی طیف زلزله به نرم افزار است. در این تحقیق طیف بدست آمده از شتابنگاشت ثبت شده از زلزله کوبه ژاپن و الاسترو انتخاب شده است. طیف استاندارد نظیر زلزله کوبه بدست آمده از نرم افزار Seismosignal، در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۸ - طیف استاندارد نظیر شتابنگاشت ثبت شده از زلزله کوبه بدست آمده از نرم افزار Seismosignal

در شکل ۵-۱۹ طیف نظیر این طیف استاندارد که در برنامه SAP2000 تعریف شده، نشان داده شده است.



بعد از مرحله تعریف طیف به برنامه، نوبت به تعریف بارهای طیفی به برنامه است که از طریق دستور Define-Load cases انجام می شود. در پنجره باز شده بارطیفی مطابق شکل ۵-۲۰ به برنامه تعریف می شود. در پایان این مرحله چون می خواهیم نتایج تنش های ایجاد شده در پل را در اثر ترکیب بار ثقلی و زلزله بدست آوریم لازم است ترکیب باری شامل این دو بار (بار ثقلی و بار طیفی) به برنامه معرفی کنیم.

Load Case Data - Response Spectrum

Load Case Name

Notes

Load Case Type

Modal Combination
☒ CQC
☐ SRSS
☐ Absolute
☐ GMC
☐ NRC 10 Percent
☐ Double Sum

GMC f1
GMC f2
Periodic + Rigid Type

Directional Combination
☒ SRSS
☐ CQC3
☐ Absolute
Scale Factor

Modal Load Case
Use Modes from this Modal Load Case

Load Type

Load Name

Function

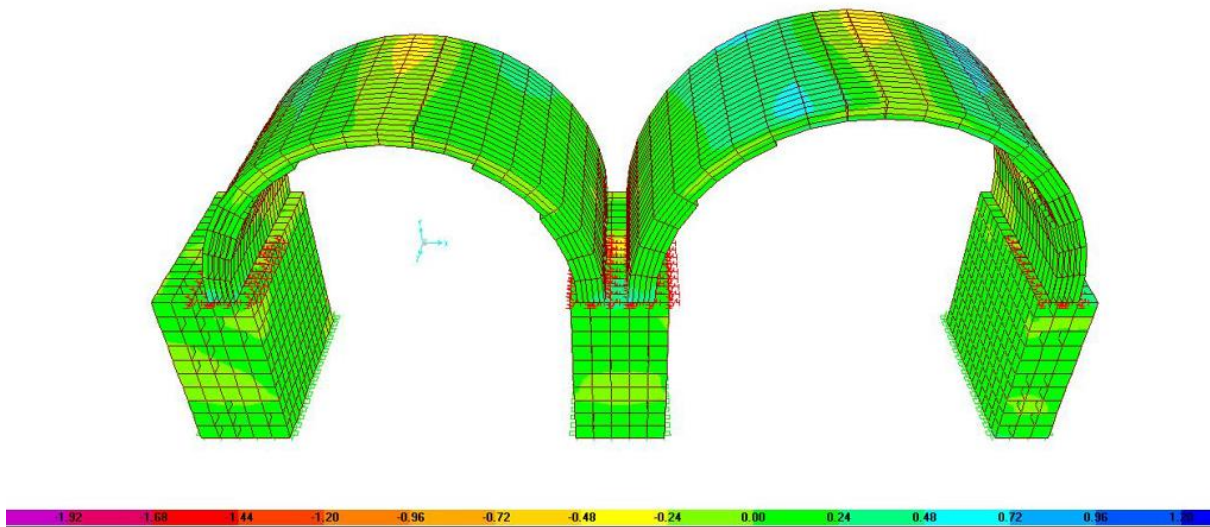
Scale Factor

☐ Show Advanced Load Parameters

Other Parameters
Modal Damping

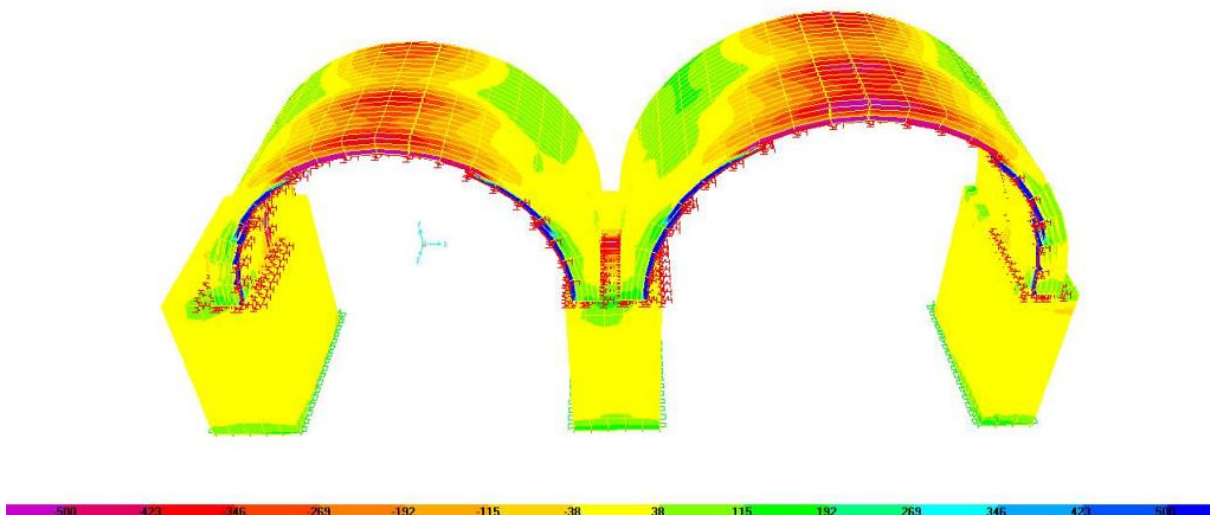
شکل ۵-۲۰- تعریف بارطیفی نظیر زلزله کوبه ژاپن در برنامه SAP2000

در این مرحله روند مدل سازی پل برای انجام تحلیل لرزه ای به اتمام رسیده و مدل آماده تحلیل است. در ادامه نتایج توزیع تنش ایجاد شده در مدل های مورد بررسی تحت اثر بار ثقلی و زلزله نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۱- چگونگی توزیع تنش ایجاد شده در سطح پل بدون مقاوم سازی بر حسب مگاپاسکال

همانطور که در شکل بالا مشاهده می شود، ماکزیمم تنش فشاری ایجاد شده در پل در این حالت $1/92$ مگاپاسکال و در حالت کششی $1/2$ مگاپاسکال است. بر این اساس هرچند مقادیر تنش های فشاری ایجاد شده در مدل از حد تنش فشاری نهایی در نظر گرفته شده برای مصالح یعنی 2 مگاپاسکال کمتر است ولی از آنجاییکه مصالح بنایی دارای مقاومت کششی کمی بوده که بین $\frac{1}{8}$ تا $\frac{1}{10}$ مقاومت فشاری است، بنابراین وجود این نواحی ماکزیمم تنش کششی بیانگر وقوع آسیب در این مناطق است. نکته دوم قابل توجه در این توزیع تنش این است که تنش های کششی در نواحی اطراف قسمت مرکزی، تاج قوس و همچنین در لبه های قوس و محل اتصال قوس به پایه ها ایجاد شده اند (نواحی آبی روشن در شکل ۵-۲۱)، که این امر نیز با برخی از گزارشات خرابی ناشی از زلزله، مطابقت دارد. طبیعتاً با خرابی این قسمت ها قسمت مرکزی قوس نیز از آسیب در امان نخواهد بود.

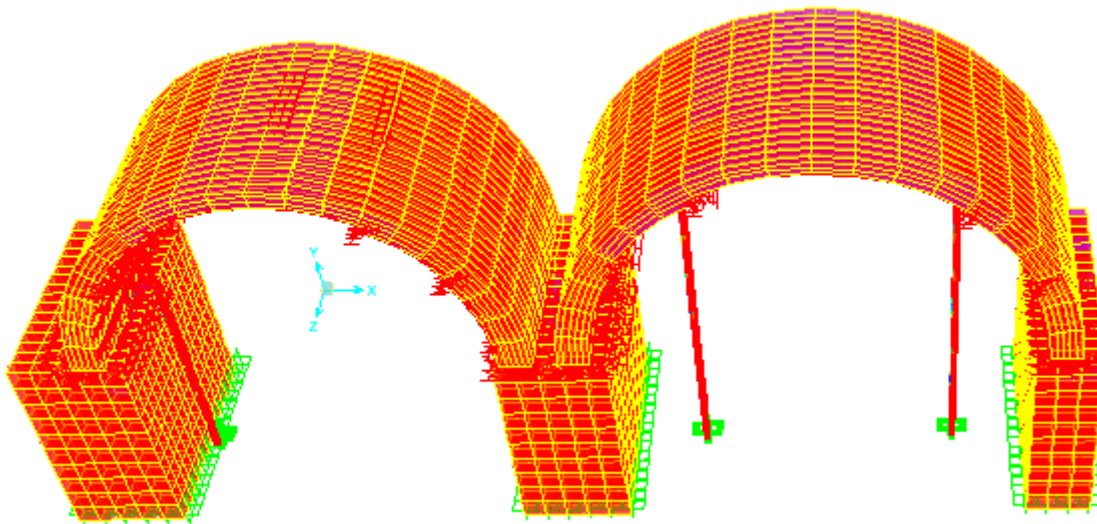


شکل ۵-۲۲- توزیع تنش در مدل مقاوم سازی شده با سه ردیف تسمه فولادی ($\times 10^{-3}$ MPa)

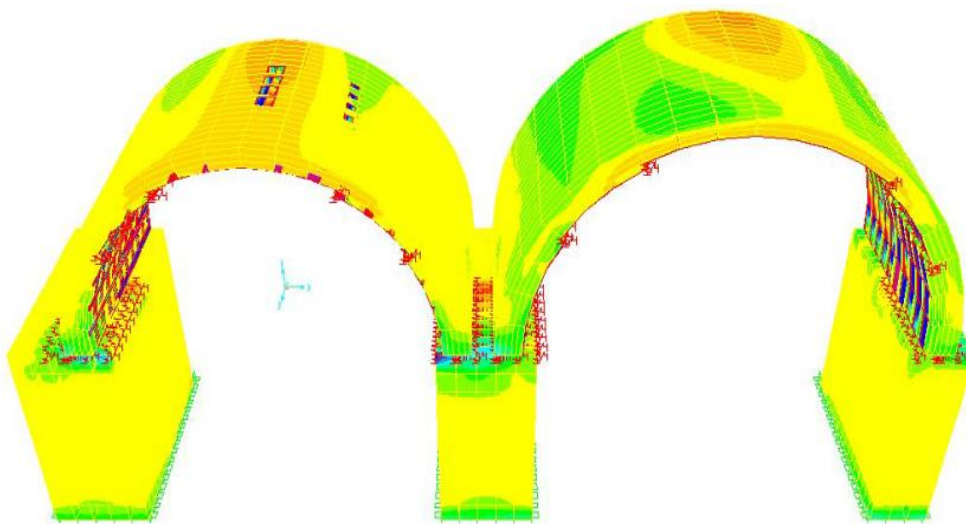
در شکل ۵-۲۲ نحوه توزیع تنش در مدل پل مقاوم سازی شده با سه ردیف تسمه فولادی تحت اثر بارهای ثقیلی و طیفی نشان داده شده است. از مقایسه این شکل با شکل ۵-۱۳ متوجه شده اثر زلزله سبب تغییر نحوه توزیع تنش در قوس شده است.

علاوه بر این مقادیر ماکزیمم تنش در قوس از ۰/۵ مگاپاسکال اندکی فراتر رفته و نکته قابل توجه این است که تعداد بیشتری از بلوک های تشکیل دهنده هر دو قوس سمت راست و چپ در معرض تنش های ماکزیمم قرار میگیرند. از بررسی انجام شده مشخص گردید تنش های کششی قابل توجهی برخلاف مدل بدون مقاوم سازی در قوس در این حالت ایجاد نشده است.

همانطور که در شکل ۵-۲۳ ملاحظه می کنید میزان تنش در پل به مقدار ۰/۴ در قست انتهایی اما اکثر مش های قوس مقداری در حدود ۰/۲ الی ۰/۳ مگاپاسکال را نشان می دهد که نشان از مناسب بودن این روش دارد.



شکل ۵-۲۳- توزیع تنش در مدل مقاوم سازی شده با ورق و ستون فولادی



شکل ۵-۲۴- توزیع تنش در مدل مقاوم سازی شده با ورق فولادی ($\times 10^{-3}$ MPa)

هرچند در حالت استفاده از ورق فولادی در چند نقطه محدود از قسمت مرکزی قوس سمت چپ تنش هایی در محدوده بین ۰/۴۲ تا ۰/۵ مگاپاسکال ایجاد می شود که نسبت به مدلی که فقط تحت اثر بار ثقلی است، بزرگتر می باشد ولی در بخش وسیعی از مدل مقادیر تنش بسیار کمتر از این مقدار هستند. در این مدل در حوالی محل اتصال قوس ها به پایه مرکزی تنش های کششی در حد بین ۰/۲۶ تا ۰/۳۴ مگاپاسکال ایجاد شده است که هر چند در محدوده تنش کششی ماده می تواند قرار گیرد ولی نشان از بحرانی بودن این ناحیه از منظر تنش های کششی ایجاد شده دارد.

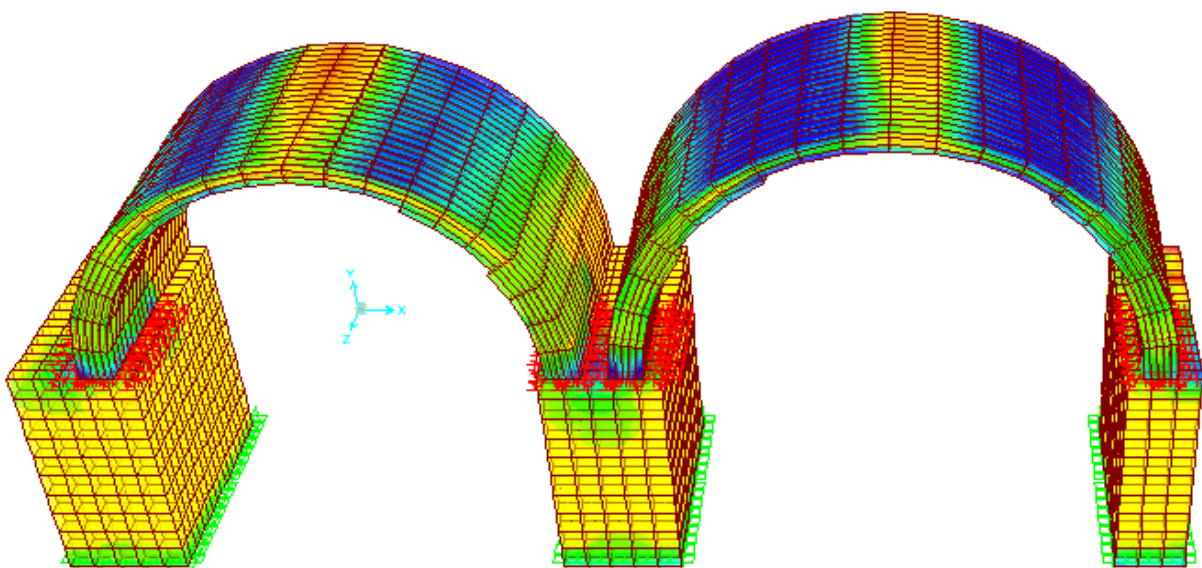
پس از زلزله کوبه مقادیر تنش در زلزله السنترو در جدول ۳-۵ قابل مشاهده است. این مقادیر با توجه به ماکزیمم تنش و میزان تنش در اکثر نقاط قوس بر حسب مگاپاسکال قابل مشاهده است.

جدول ۳-۵- میزان تغییر مکان بر حسب میلیمتر در قوس سمت چپ

تنش در غالب نقاط قوس	تنش ماکزیمم	تنش بر حسب مگاپاسکال
۰/۸	۱/۰۲	سازه بدون تسلیح
۰/۳	۰/۵۷	سه تسمه فولادی
۰/۱۵	۰/۳۱	ورق فولادی
۰/۲	۰/۴	ستون و ورق فولادی

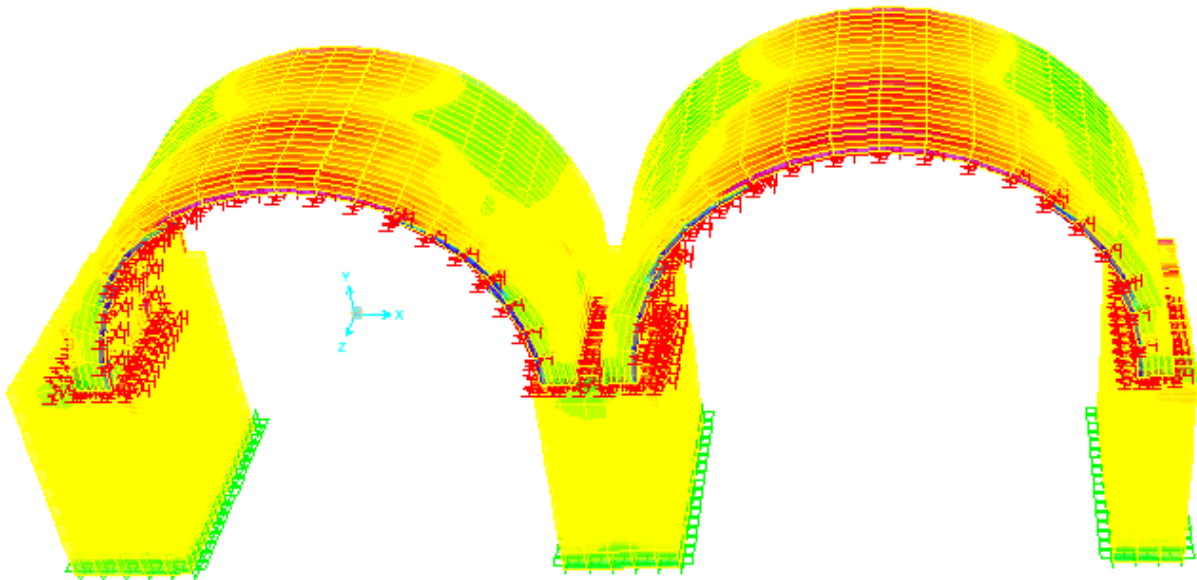
پس از وارد کردن بار زلزله میزان تغییر مکان ها در جهت بارهای زلزله مختلف در سه سازه ای که با سه تسمه فولادی، ورق فولادی با ضخامت ۲ سانتیمتر و ستون و ورق فولادی استفاده شده است با توجه به جدول های ۴-۵ و ۵-۵ به ترتیب برای قوس سمت راست و قوس سمت چپ قابل مشاهده می باشد.

در شکل های ۵-۲۵ تا ۵-۲۸ تنش های موجود در سازه ها با انواع روش های مقاوم سازی تحت اثر زلزله السنترو قابل مشاهده است.



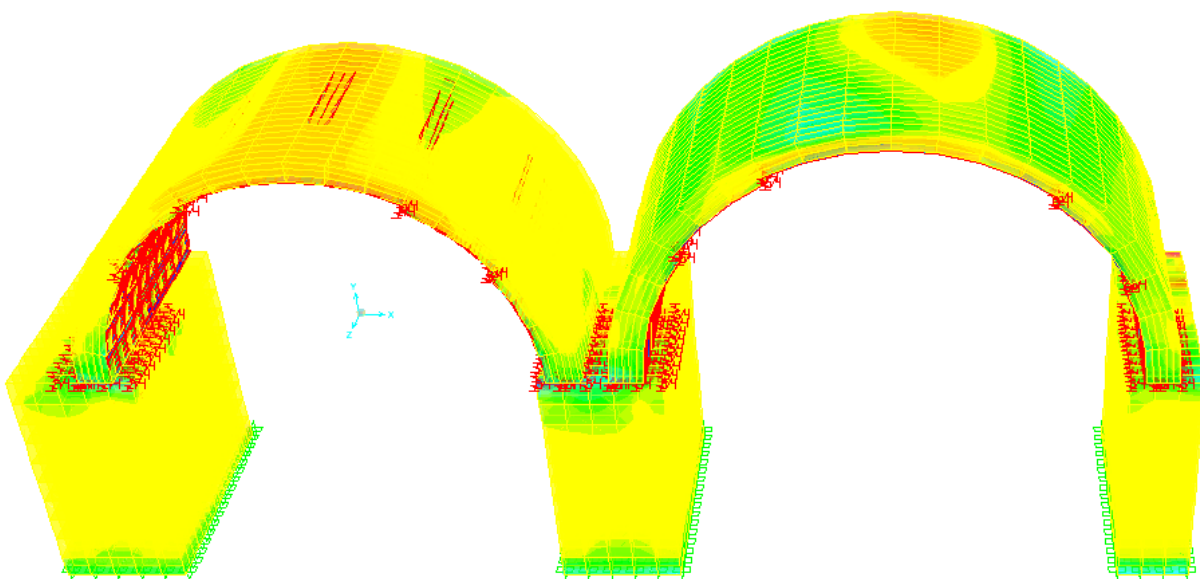
شکل ۵-۲۵- توزیع تنش در سازه بدون مقاوم سازی

با توجه به شکل ۵-۲۳ تنش در غالب نقاط قوس بصورت کششی است. میزان تنش ماکزیمم در قوس سمت راست به ۰/۹۵ مگاپاسکال و در اکثر نقاط در حدود ۰/۵ مگاپاسکال می باشد.



شکل ۵-۲۶- تنش در قوس با سه تسمه فولادی

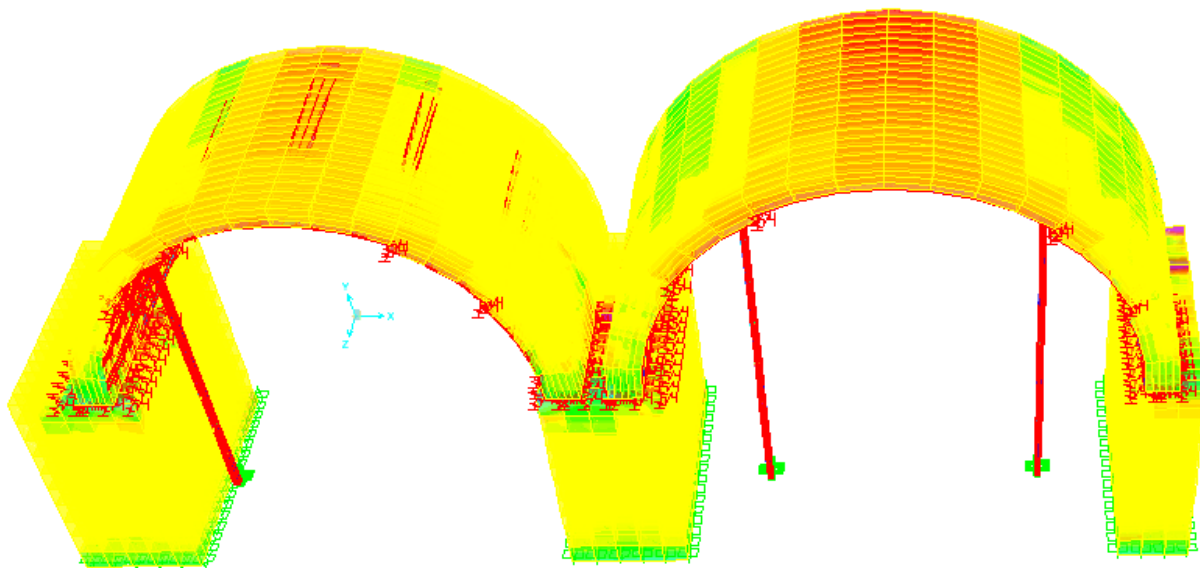
میزان تنش در قوس سمت راست در شکل ۵-۲۴ به میزان ۰/۲۵ بصورت متوسط در بیشتر نقاط قوس قابل مشاهده است در حالیکه تنش ماکزیمم به ۰/۴۷ مگاپاسکال می رسد.



شکل ۵-۲۷- توزیع تنش در سازه مقاوم سازی شده با ورق فولادی

همانطور که در شکل ۵-۲۵ دیده می شود تنش ها بسیار یکنواخت و در کل قوس بصورت یکپارچه توزیع شده است به گونه ای که میزان تنش ماکزیمم برابر با $0/15$ مگاپاسکال و در سایر نقاط تنش های $0/1$ مگاپاسکال و کمتر ملاحظه می شود.

در شکل ۵-۲۶ تنها میزان تنش ماکزیمم با مدل ورق فولادی تفاوت دارد یعنی در قوس سمت راست ماکزیمم تنش به اندازه $0/4$ مگاپاسکال اما تنش در غالب نقاط در نزدیکی $0/1$ مگاپاسکال می باشد.



شکل ۵-۲۸- مدل مقاوم سازی شده با ورق فولادی و ستون های فلزی

جدول ۵-۴- میزان تغییر مکان بر حسب میلیمتر در قوس سمت راست

تغییر مکان (بر حسب میلیمتر)	زلزله کوبه		زلزله السترو	
	در جهت X	در جهت Z	در جهت X	در جهت Z
سازه بدون تسلیح	۱/۷۵	۲	۳/۲۲	۲/۵۱
سه تسمه فولادی	۰/۲	۱/۱	۰/۲۲	۱/۱۱
ورق فولادی	۰/۴۷	۲	۱/۱	۲/۴
ستون و ورق فولادی	۰/۱۵	۱/۴۶	۰/۱۲	۱/۴۷

جدول ۵-۵- میزان تغییر مکان بر حسب میلیمتر در قوس سمت چپ

تغییر مکان (بر حسب میلیمتر)	زلزله کوبه		زلزله السترو	
	در جهت X	در جهت Z	در جهت X	در جهت Z
سازه بدون تسلیح	۰/۷۵	۱/۸	۱/۳۶	۱/۹
سه تسمه فولادی	۰/۰۹	۰/۹۲	۰/۰۸	۰/۹۵
ورق فولادی	۰/۲۳	۱/۱	۰/۲۷	۱/۲۲
ستون و ورق فولادی	۰/۱۲	۰/۶۵	۰/۰۶	۰/۹۲

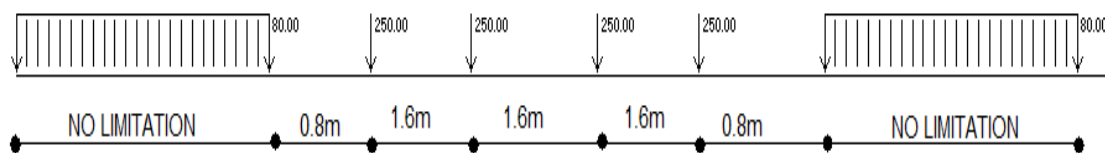
با توجه به زلزله های کوبه و السترو مقادیر تنش ها و تغییر مکان ها بررسی شد. به نظر می رسد مناسب ترین روش با توجه به بررسی های ارائه شده استفاده از ستون به همراه ورق فولادی و همچنین ورق فولادی با ضخامت ۲ سانتیمتر می باشد. برای مقایسه دقیق تر بین این دو روش بار زنده قطار را بر روی این دو روش مقاوم سازی بررسی کرده و با توجه به معیارهای تنش و تغییر مکان، روش مناسب ارائه خواهد شد.

۵-۶- تحلیل پل بوسیله بار قطار

۵-۶-۱- بارگذاری قطار

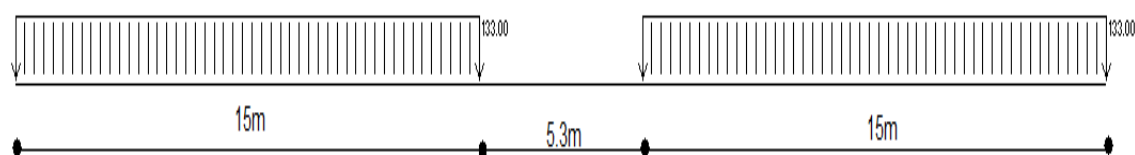
استاندارد بارگذاری بار زنده راه آهن شامل دو نوع RU و RL می باشد. بارگذاری RU شامل ترکیب وسایل نقلیه ریلی که از خط عبور کند می باشد و برای خطوط با عرض ۱/۴ متر طراحی شده اما بارگذاری RL فقط در خطوط مسافری سریع می باشد (Highways Agency 2007).

- بارگذاری RU شامل چهار بار ۲۵۰ KN متمرکز همراه با بار یکنواخت ۸۰ KN/m می باشد ترتیب این بار در شکل زیر نشان داده شده است.



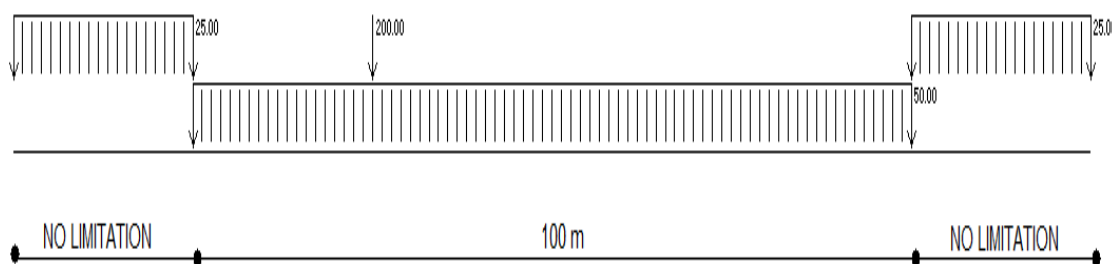
شکل ۵-۲۹- بار زنده نوع RU

- بار اسمی SW/0 شامل دو بار یکنواخت ۱۳۳ KN به شکل زیر می باشد.



شکل ۵-۳۰- بار زنده نوع SW/0

- بار RL شامل یک بار متمرکز ۲۰۰ KN همراه با یک بار یکنواخت ۵۰ KN/m در طول بالای ۱۰۰ متر می باشد. تا ۱۰۰ متر بار همان ۵۰ KN/m و از ۱۰۰ متر به بالا ۲۵ KN/m می باشد.



شکل ۵-۳۱- بار زنده نوع RL

۵-۶-۲- ضریب دینامیکی

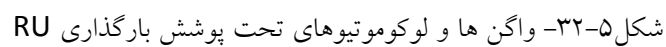
بارگذاری های ذکر شده در قسمت قبل، بارگذاری معادل استاتیکی می باشند و جهت در نظر گرفتن اثر ضربه، نوسان و دیگر اثرات ناشی از حرکت و اینتر اکشن چرخ و ریل بایستی در یک ضریب دینامیکی ضرب شوند.

- بارگذاری RU و SW/0

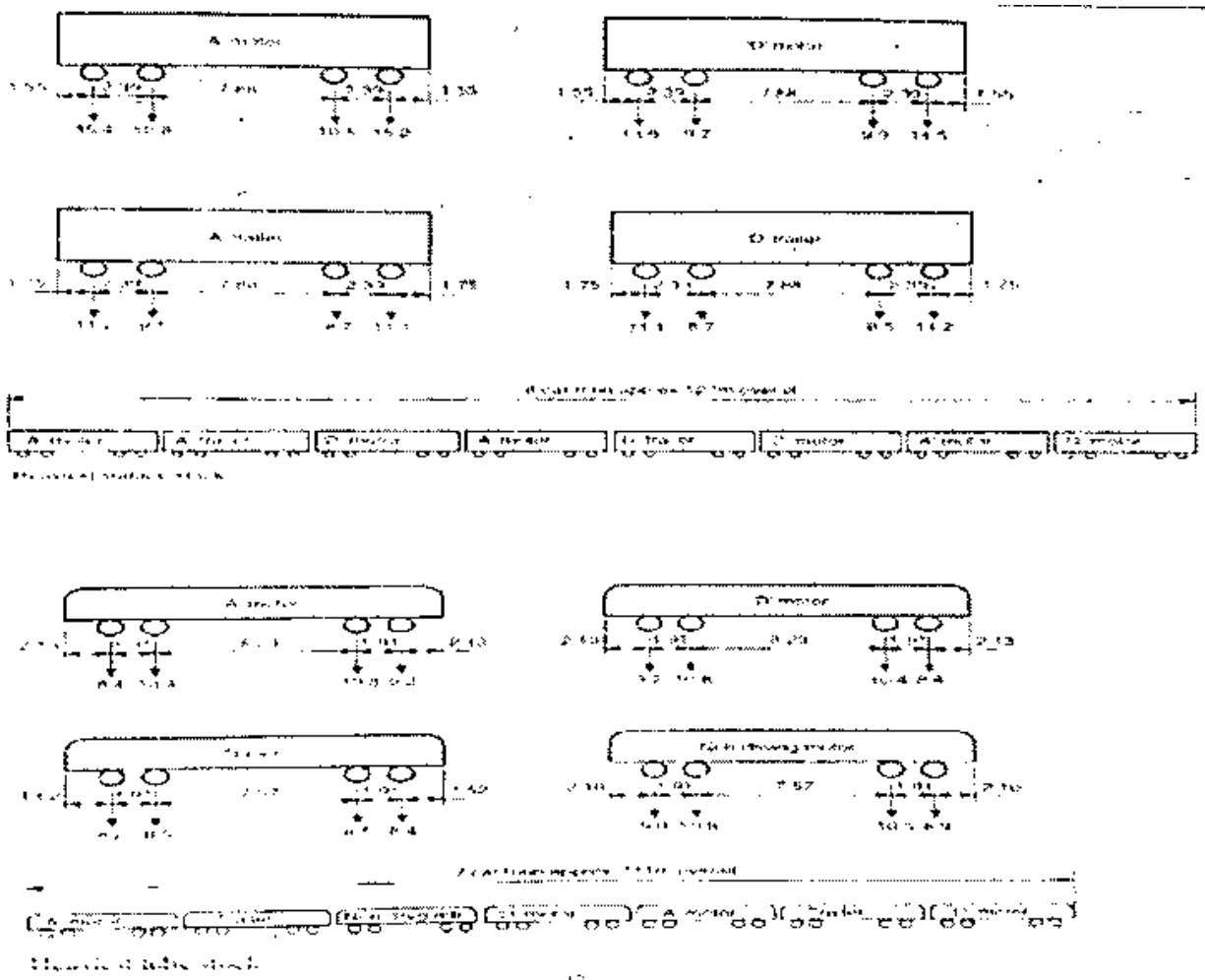
جدول ۵-۶- فاکتور دینامیکی برای بارگذاری RU

Dimension L (m)	Dynamic factor for evaluating	
	Bending moment	Shear
Up to 3.6	۲	۱.۶۷
From 3.6 to 67	$۰.۷۳ + \frac{۲.۱۶}{L^{۰.۵} - ۰.۲}$	$۰.۸۲ + \frac{۱.۴۴}{L^{۰.۵} - ۰.۲}$
Over 67	۱	۱

این بارگذاری بر اساس استاندارد UIC می باشد در شکل زیر لوکوموتیو و واگن های تحت پوشش این بارگذاری نشان داده شده است.



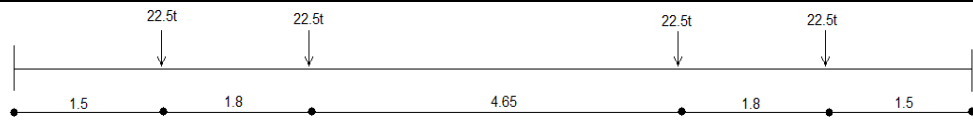
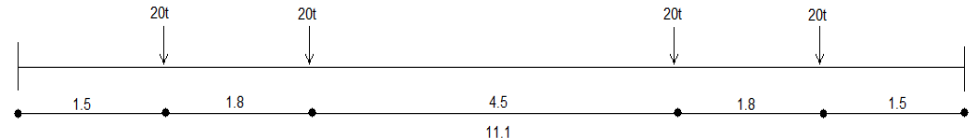
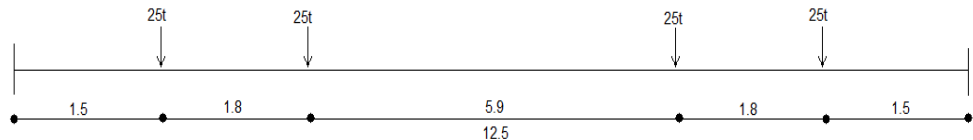
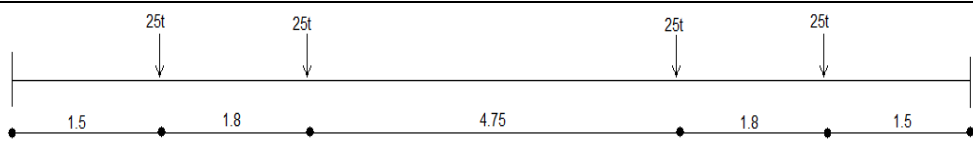
در شکل زیر واگن های باری تحت پوشش بارگذاری RL نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۳- واگن ها و لکوموتیوهای تحت پوشش بارگذاری RL

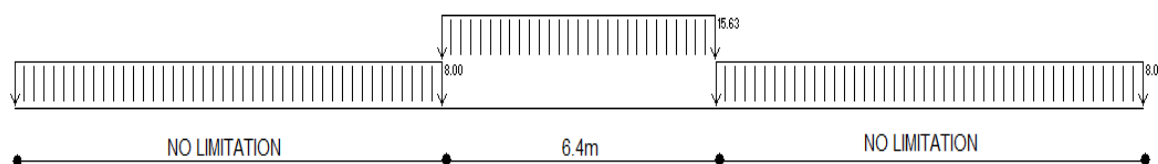
در بارگذاری RL در خطوط بالاستی برای خمش و برش ضریب $1/2$ و برای خطوط بدون بالاست $1/4$ می باشد. انواع مدل های بارگذاری و استاندارد های مرتبط با آن در جدول زیر ذکر شده است: (limitstste-b, 2007)

جدول ۵-۷- خلاصه انواع مدل های بارگذاری

Description	Loading
Load model Y1- No UDL (UIC776-1 R. UIC702)	
Load train D4 (UIC700)	
Load train C3 (UIC700)	
Load train E4 (UIC700)	
Load train E5 (UIC700)	

۵-۶-۳- مدل بارگذاری انتخابی

مطابق بارگذاری UIC776-1R و UIC702 شامل ۴ محور ۲۵ تن به فواصل ۱/۶ متر و بار گسترده ۸ تن بر متر طول به فاصله ۰/۸ متر از محورهای ابتدایی و انتهایی و به طول بی نهایت در نظر گرفته می شود. بارهای زمان طراحی مطابق UIC70 ، ۰/۸ مقادیر فوق بوده و در حال حاضر تحت عنوان بارگذاری سبک در آئین نامه ایران شناخته می شود. می توان بار زنده را بصورت زیر فرض نمود:



شکل ۵-۳۴- بار قطار استاندارد بصورت گسترده

بارگذاری بار زنده بر روی دو مدل از پل هایی که تحت اثر بارگذاری لرزه ای تحت عنوان بین مقاوم سازی های لرزه ای بوده اند تحت اثر بار زنده قرار می گیرند تا بهترین مدل انتخاب بین این دو روش انتخاب شود. مدل های ورق فولادی ۲ سانتیمتر در زیر قوس و استفاده همزمان از ورق ۱ سانتی متر و ستون فولادی با مقطع ۱۰۰ سانتی متر مربع را تحت اثر بار زنده قرار داده می شوند.

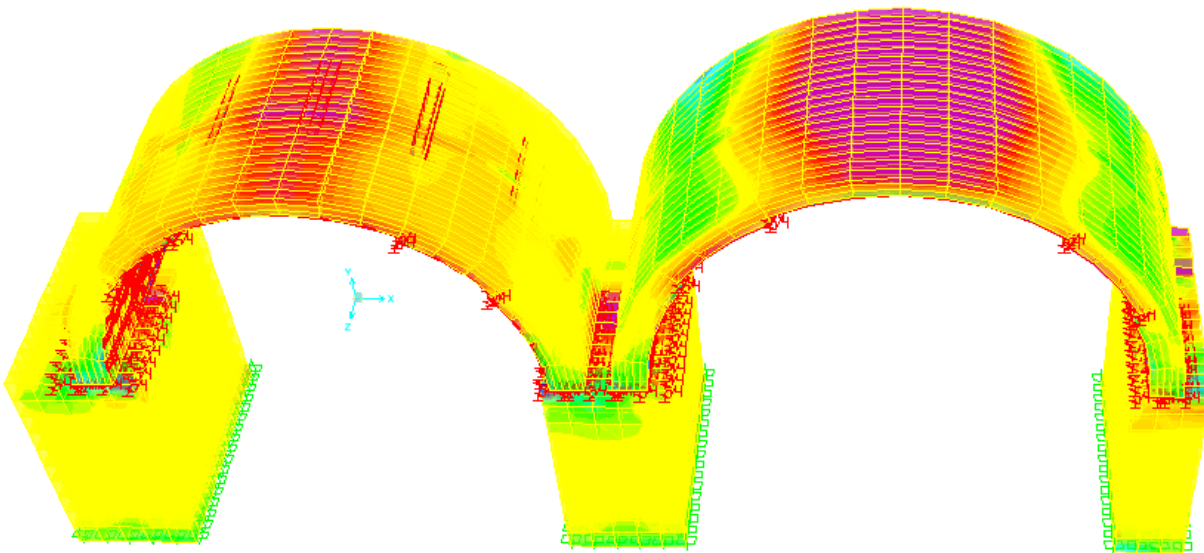
۵-۶-۴- نحوه اعمال بار

با توجه به اینکه طول دهانه های پل نزدیک به ۶/۴ متر می باشد لذا مقادیر $15/625 \text{ Ton/m}$ و 8 Ton/m بصورت جداگانه به هر یک از دهانه های پل وارد می شوند. در واقع یک بار به کل سازه بار گسترده $15/625 \text{ Ton/m}$ و باری دیگر مقدار 8 Ton/m وارد خواهد شد. بدلیل وارد کردن بار بصورت استاتیکی و در نظر گرفتن اثر ضربه بار مرده به اندازه ۲۰ درصد و بار زنده به اندازه ۴۰ درصد اضافه در نظر گرفته می شود.

• اعمال بار گسترده 8 Ton/m

در قوس سمت راست میزان تنش ماکزیمم به ۱ مگاپاسکال و تنش در نقاط نزدیک به بار قطار در حدود $0/2$ تا $0/5$ مگاپاسکال، در نقاط نزدیک به ستون ها و سایر نقاط بسیار ناچیز می باشد و در قوس سمت چپ میزان تنش ماکزیمم به $0/98$ مگاپاسکال و تنش در نقاط نزدیک به بار قطار در حدود $0/2$ تا $0/5$ مگاپاسکال و در سایر نقاط قابل توجه نیست.

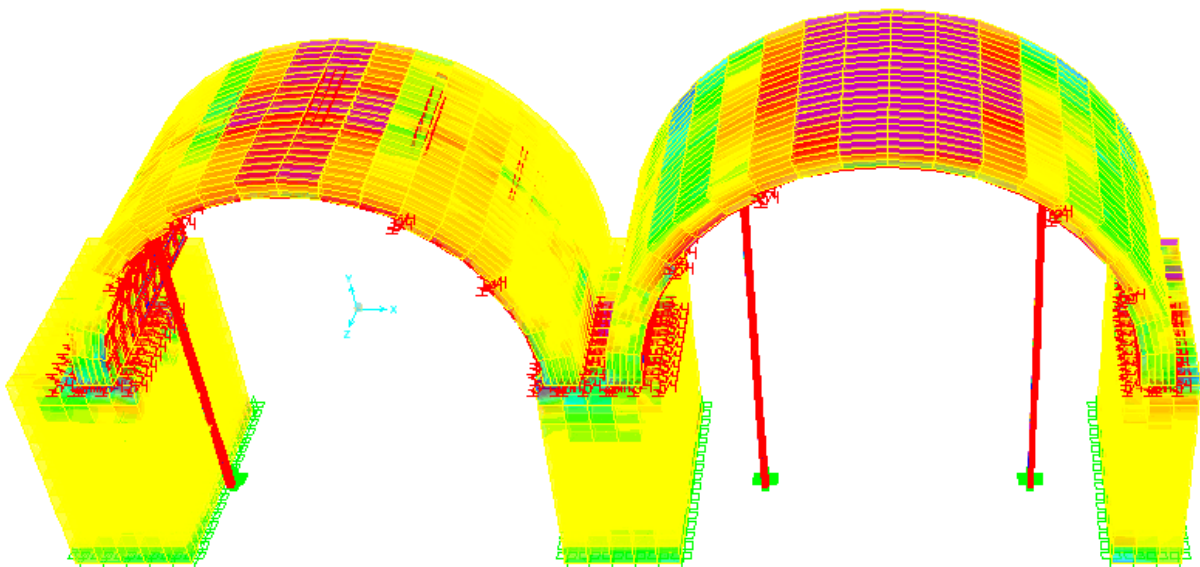
میزان جابه جایی در قوس سمت راست در $1/73$ میلیمتر و در قوس سمت چپ $0/61$ میلیمتر می باشد.



شکل ۵-۳۵- سازه مدل شده با ورق فولادی به ضخامت ۲ سانتیمتر

در قوس سمت راست میزان تنش ماکزیمم به 0.98 مگاپاسکال و تنش در نقاط نزدیک به بار قطار در حدود 0.3 تا 0.5 مگاپاسکال و سایر نقاط بسیار ناچیز می باشد و در قوس سمت چپ میزان تنش ماکزیمم به 0.48 مگاپاسکال و تنش در نقاط نزدیک به بار قطار در حدود 0.2 تا 0.35 مگاپاسکال و در سایر نقاط قابل توجه نیست.

میزان جابه جایی در قوس سمت راست در $1/28$ میلیمتر و در قوس سمت چپ 0.7 میلیمتر می باشد.

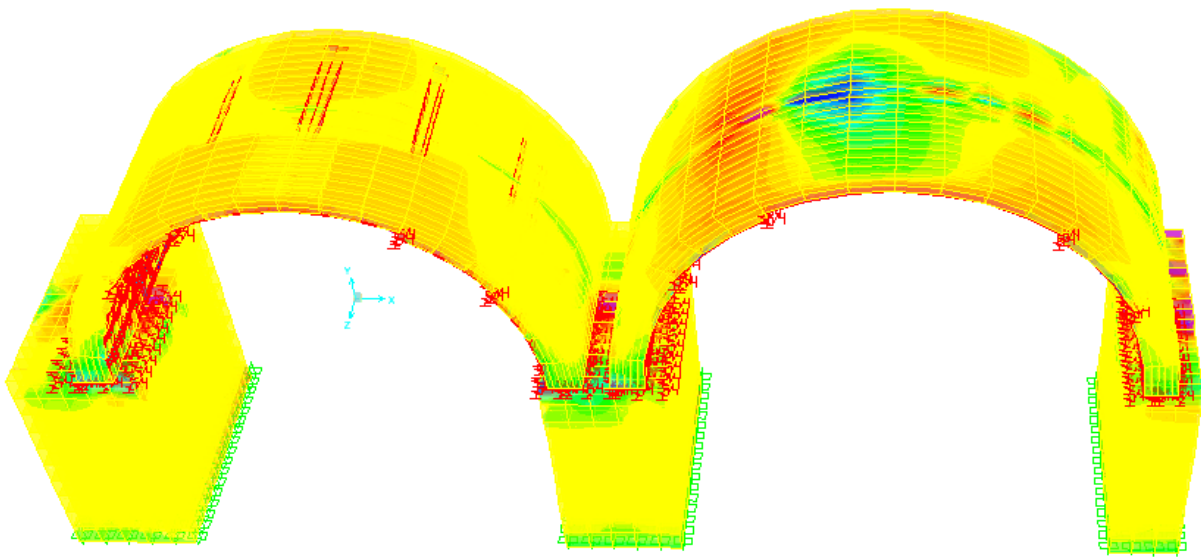


شکل ۵-۳۶- توزیع تنش در سازه مقاوم سازی شده با ستون و ورق فولادی

• اعمال بار گسترده $15/625 \text{ Ton/m}$

در قوس سمت راست میزان تنش ماکزیمم به 3 مگاپاسکال و تنش در نقاط نزدیک به بار قطار در حدود 0.1 تا 0.4 مگاپاسکال، در نقاط نزدیک به ستون ها و سایر نقاط بسیار ناچیز می باشد و در قوس سمت چپ میزان تنش ماکزیمم به 0.44 مگاپاسکال و تنش در نقاط دیگر 0.1 تا 0.25 مگاپاسکال و در سایر نقاط کمتر از 0.1 کمتر از این مقدار می باشد.

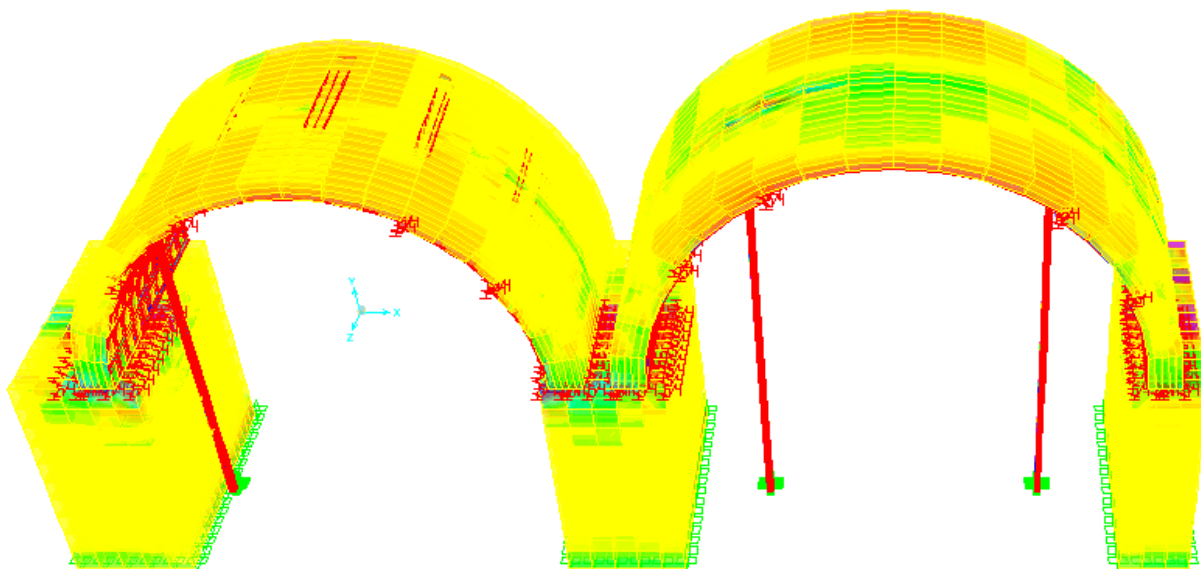
میزان جابه جایی در قوس سمت راست در $1/1$ میلیمتر و در قوس سمت چپ 0.8 میلیمتر می باشد.



شکل ۵-۳۷- سازه مدل شده با ورق فولادی به ضخامت ۲ سانتیمتر

در قوس سمت راست میزان تنش ماکزیمم به $2/29$ مگاپاسکال و تنش در نقاط نزدیک به بار قطار در حدود $0/1$ تا $0/4$ مگاپاسکال و سایر نقاط بسیار ناچیز می باشد و در قوس سمت چپ میزان تنش ماکزیمم به $0/33$ مگاپاسکال و تنش در نقاط نزدیک به بار قطار در حدود $0/1$ تا $0/2$ مگاپاسکال و در سایر نقاط قابل توجه نیست.

میزان جابه جایی در قوس سمت راست در $1/14$ میلیمتر و در قوس سمت چپ $0/93$ میلیمتر می باشد.



شکل ۵-۳۸- توزیع تنش در سازه مقاوم سازی شده با ستون و ورق فولادی

با توجه به میزان تنش ها و جابه جایی های اعمال شده میتوان نتیجه گرفت پل مقاوم سازی شده با ورق فولادی با ضخامت ۲ سانتیمتر دارای تنش ها و تغییر مکان های یکپارچه تر و از طرفی توزیع تنش های کمتری می باشد لذا استفاده از این روش با توجه به بارگذاری ثقیلی، بارگذاری لرزه ای و بارگذاری بار قطار انتخاب و توصیه می شود. اما بنظر می رسد استفاده از ستون فولادی در قوس سمت راست (بلندتر) ضروری می باشد لذا نهایتا پیشنهاد می شود دهانه بلندتر علاوه بر ورق فولادی از ستون نیز استفاده گردد.

۵-۷- معیار سنجش نیروهای وارده به پل

در جدول زیر که در واقع یکی از قسمت های آیین نامه FEMA می باشد و مرتبط با مصالح بنایی است ملاحظه می شود میزان تنش مجاز برای مصالح بنایی بسته به نوع آن ها که به سه دسته اصلی تقسیم می شود وابسته است. این سه دسته شامل خوب، متوسط و ضعیف می باشد، میزان تنش مجاز به ترتیب برابر با ۶/۱، ۴/۲ و ۲/۱ مگاپاسکال است.

جدول ۵-۸- میزان تنش مجاز در سازه های بنایی

Table 7-1 Default Lower-Bound Masonry Properties

Property	Masonry Condition ¹		
	Good	Fair	Poor
Compressive Strength (f'_m)	900 psi	600 psi	300 psi
Elastic Modulus in Compression	$550f'_m$	$550f'_m$	$550f'_m$
Flexural Tensile Strength ²	20 psi	10 psi	0
Shear Strength³			
Masonry with a running bond lay-up	27 psi	20 psi	13 psi
Fully grouted masonry with a lay-up other than running bond	27 psi	20 psi	13 psi
Partially grouted or ungrouted masonry with a lay-up other than running bond	11 psi	8 psi	5 psi

1. Masonry condition shall be classified as good, fair, or poor as defined in this standard.

با توجه به اینکه در ابتدا پل در وضعیت بدی قرار داشته و سپس تعمیر و مرمت اولیه انجام شده است لذا می توان وضعیت پل را در حالتی بین ضعیف و متوسط دانست. با این حال با توجه به اینکه پل بسیار قدیمی می باشد سعی شده است تنش های وارده به پل نهایتا از ۳ مگاپاسکال بیشتر نشود و محدود به ۲/۱ مگاپاسکال باشد.

فصل ششم:

نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات برای تحقیقات آتی

۶-۱- مقدمه

در این پایان نامه به منظور بررسی فنی و اقتصادی روش های مقاوم سازی پل های قوسی سنگی، ابتدا نمونه ای از پل قوسی سنگی انتخاب گردید و سپس با استفاده از نتایج بدست آمده از تحلیل مدل نظیر این پل در دو نرم افزار ABAQUS و SAP2000 به بررسی و مقایسه رفتاری پل بین دو حالت، پل بدون مقاوم سازی و پل مقاوم سازی شده پرداختیم. به منظور مقاوم سازی پل از چهار روش زیر استفاده شده است.

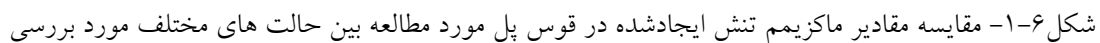
- ۱- استفاده از تسمه های فولادی متصل شده به زیر قوس
 - ۲- استفاده از ورق فولادی که در تمام سطح قوس قرار گرفته است و به پایه و سطح قوس کاملاً مقید شده است.
 - ۳- استفاده از ورق و ستون فولادی به شکلی که ضخامت ورق فولادی از روش شماره ۲ کمتر شده است.
 - ۴- استفاده از ورق های FRP متصل شده با چسب به قوس
- به منظور بررسی کارایی سه روش اول مقاوم سازی در پایداری لرزه ای قوس، نقش این دو حالت مقاوم سازی در حالت اعمال بار ثقیلی و زلزله به صورت همزمان نیز مورد تحلیل و مطالعه قرار گرفت.

جهت تحلیل لرزه ای مدل ها از روش تحلیل طیفی بر مبنای طیف استاندارد بدست آمده از زلزله کوبه ژاپن و السنتر استفاده شد. برای مقایسه کارایی روش های مقاوم سازی مقادیر ماکزیمم تنش ایجاد شده در پل مقایسه شد و برای مقایسه اقتصادی قیمت مصالح مصرفی در هر روش مورد بررسی قرار گرفت.

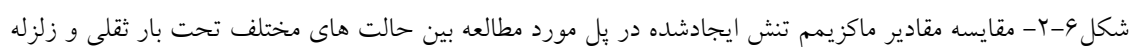
۶-۲- نتیجه گیری

با توجه به اینکه می توان بیان نمود که روش برگزیده استفاده از ورق فولادی بوده است، در بخش نتیجه گیری تنها مقایسه میان روش های استفاده از ورق فولادی با ضخامت دو سانتیمتر و تسمه های فولادی (تنها روش استفاده شده در راه آهن ایران) و ورق FRP (استفاده در پایان نامه مهندس تقی زاده) صورت می گیرد و از روش ستون فولادی صرف نظر می گردد.

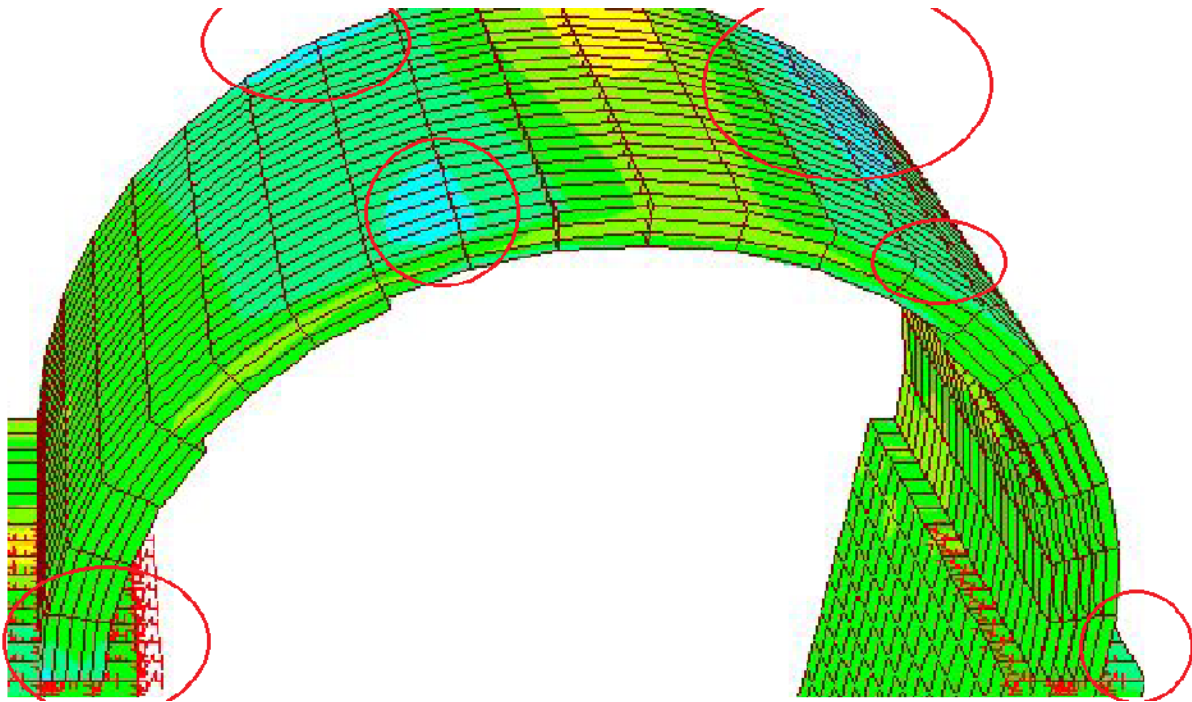
از بررسی نتایج تحلیل های انجام شده در دو نرم افزار SAP و ABAQUS مقادیر ماکزیمم تنش ایجاد شده در قوس در دو حالت کلی قوس بدون مقاوم سازی و قوس مقاوم سازی شده با سه روش اشاره شده در بالا به صورت نمودار میله ای در شکل ۶-۱ نشان داده شده است.



در شکل ۶-۲ مقادیر ماکزیم تنش ایجاد شده در پل در دو حالت بدون مقاوم سازی و مقاوم سازی شده با استفاده از دو روش تسمه و ورق فولادی ، ناشی از بارگذاری توام ثقلی و زلزله به صورت مقایسه ای نشان داده شده است.



مطابق نمودار نشان داده شده در شکل ۶-۲ استفاده از روش های مقاوم سازی اشاره شده علاوه بر اینکه ماکزیمم تنش های فشاری ایجاد شده در پل را به شدت کاهش می دهند، مقادیر تنش های کششی ایجاد شده در برخی از قسمت های مدل در حالت بدون مقاوم سازی که براساس مقاومت کششی ضعیف سنگ و دیگر مصالح بنایی، تنش های نسبتاً بزرگی بودند و سبب خرابی به این قسمت ها می شدند را کاهش داده و در حد مقاومت کششی معمول مصالح بنایی قرار می دهند. به عبارت دیگر از تحلیل لرزه ای صورت گرفته، نکته قابل توجه ایجاد نواحی بحرانی تنش کششی در قسمت های مختلف پل به ویژه در لبه ها و نواحی اتصال قوس به پایه می باشد (شکل ۶-۳).

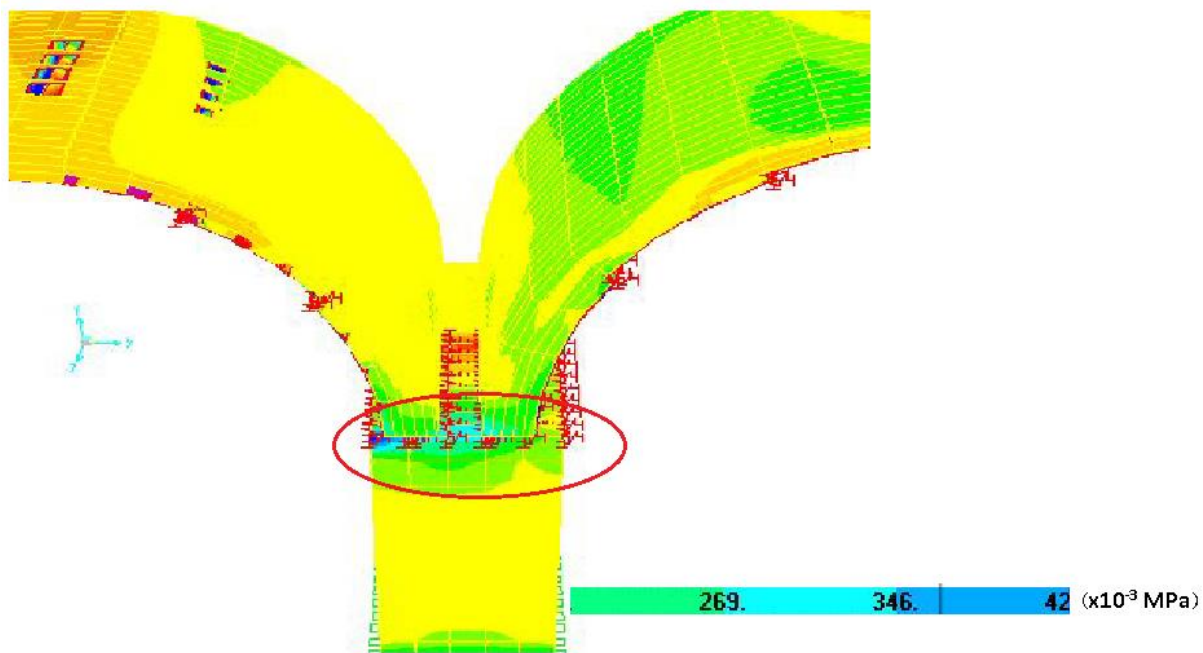


شکل ۶-۳- نواحی ایجاد تنش های کششی بحرانی در پل مقاوم سازی نشده تحت اثر بار ثقلی و زلزله

در شکل ۶-۴ نواحی توزیع تنش کششی برای مدل مقاوم سازی شده با ورق فولادی نشان داده شده است. از بررسی این شکل می توان دریافت که:

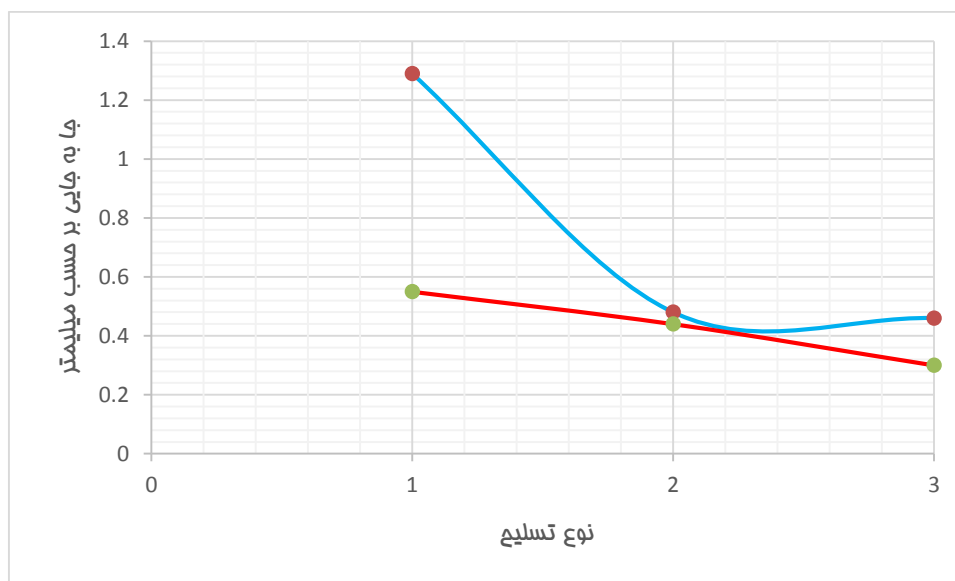
اولاً نواحی تنش کششی ایجاد شده در این مدل گستردگی نواحی نظیر در مدل پل مقاوم سازی نشده نداشته و معطوف به محل اتصال قوس ها به پایه مرکزی پل می باشد.

ثانیاً هرچند در این ناحیه تنش های کششی ایجاد می شود ولی مقدار این تنش ها در حد و اندازه مقاومت کششی مصالح استفاده شده در ساخت پل می باشد و صرفاً به عنوان نواحی قابل توجه جهت بازرسی های بعدی شناخته می شوند و نه مثل نواحی بحرانی تنش کششی در پل مقاوم سازی نشده که محل های ایجاد خسارت در پل هستند.

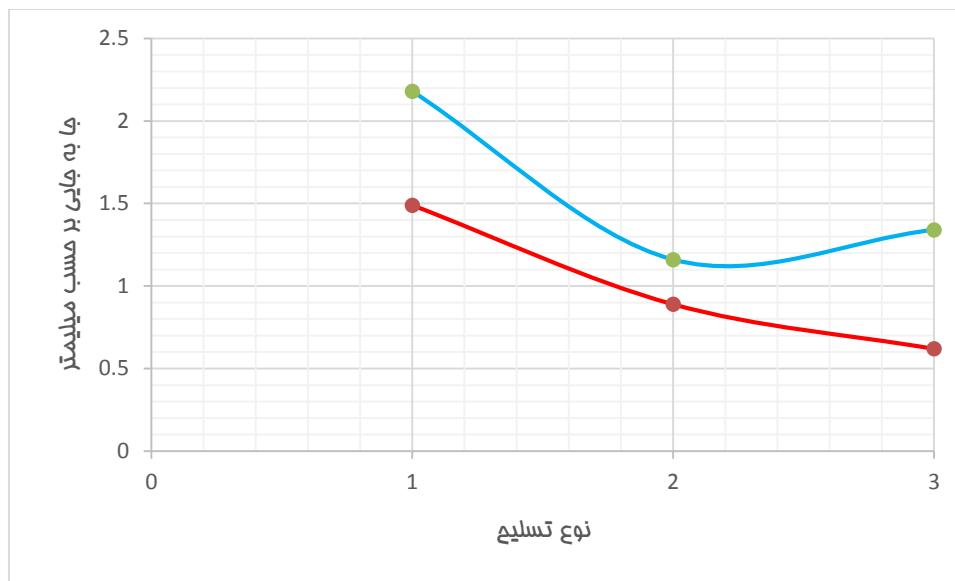


شکل ۶-۴- نواحی ایجاد تنش های کششی بحرانی در پل مقاوم سازی شده با ورق فولادی تحت اثر بار ثقیلی و زلزله

یکی دیگر از عوامل مهم در سازه های بنایی میزان جابه جایی و تغییر شکل سازه بر اساس بارهای وارده و نوع تسلیح موجود در سازه می باشد. در شکل های ۶-۵ و ۶-۶ میزان جابه جایی سازه تحت بارهای مرده، زنده و تحت بار زلزله بررسی شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. در این شکل ها میزان ماکزیمم جابه جایی بر حسب میلیمتر و به ترتیب بدون وجود تسلیح و تسلیح بوسیله میلگرد و صفحه فولادی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۶-۵- تغییر شکل سازه تحت اثر بارهای ثقیلی به تفکیک در قوس سمت چپ و راست



شکل ۶-۶- تغییر شکل سازه تحت اثر بارهای ثقیلی و زلزله به تفکیک در قوس سمت چپ و راست

در خصوص مقایسه اقتصادی روش های مقاوم سازی شده ابتدا لازم است برآوردی از قیمت هر آیتیم در بازار داشته باشیم. براین اساس قیمت هر کیلو تسمه به ضخامت ۱۰ میلیمتر، ۲۱۰۰۰ ریال و برای ورق فولادی گالوانیزه به ضخامت ۲۰ میلیمتر در حدود ۲۹۰۰۰ ریال می باشد این درحالی است که یک مترمربع ورق FRP حدود ۱۰۰۰۰۰۰ ریال می باشد. نکته قابل توجه در اینجا این است که در خصوص مقاوم سازی پل مورد مطالعه با ورق های FRP و نتایج بدست آمده از آن، اولاً ورق های FRP در قوس و خاکریز روی قوس استفاده شده اند، ثانیاً مجموع اقدامات مقاوم سازی بر روی این پل نظیر ترمیم سنگ ها، تزریق، استفاده از اعضای فولادی دوخته شده در قسمت های مختلف پل انجام شده و مقادیر تنش گزارش شده در مطالعه Tecchio و همکاران [۴۸] بر اساس انجام کلیه این اقدامات بوده است. در حالیکه دو روش مقاوم سازی با استفاده از تسمه و ورق فولادی فقط بر روی قوس پل انجام شده است.

اما چنانچه هزینه مصالح مصرفی برای اجرای هر یک از این سه روش را برای قوس سمت راست (قوس با طول دهانه بزرگتر) محاسبه کنیم با توجه به استفاده از چهار لایه ورق FRP بدست خواهد آمد:

جدول ۶-۱- هزینه بابت استفاده از تسلیحات ارائه شده

نوع روش مقاوم سازی	قیمت مصالح مصرفی جهت اجرا (ریال)
تسمه فولادی	۱۰۸۸۰۱۰
ورق فولادی گالوانیزه	۳۴۶۰۲۸۰۰۰
۴ لایه ورق FRP	۳۰۴۰۰۰۰۰۰
ستون و ورق فولادی	۲۸۰۰۰۰۰۰۰

در پایان می توان چنین نتیجه گرفت که یکی از سریع ترین و موثرترین روش ها در زمانیکه نیاز به هزینه کم می باشد و زمان کافی وجود ندارد می توان از روش تسمه فولادی استفاده کرد. چنانچه در پی روشی کارآمد، با دوام و تاثیر پذیری بیشتر می بایست از ورقه های فولادی، ورق فولادی به همراه ستون و الیاف FRP استفاده کرد اما بین این سه روش با توجه به نتایج بدست آمده بنظر می رسد مناسب ترین روش از نظر فنی و اقتصادی استفاده از صفحه های فولادی می باشد.

۶-۲-۱- سایر نتایج

با توجه به انواع سازه های بررسی شده می توان نتایج زیر را گرفت:

- تاثیر تسمه فولادی بصورت موضعی می باشد یعنی فقط در نقاطی که استفاده می شود در برابر تغییر شکل سازه به مقدار زیادی تاثیرگذار است.
- ورق فولادی با ضخامت کمتر از دو سانتیمتر در تغییر شکل سازه زیاد موثر نیست لذا با توجه به سازه پل باید انتخاب دقیق و مناسبی داشت.
- ستون در این پل ها تاثیر زیادی بر مقاومت سازه دارد و هر چه به مرکز پل نزدیک تر باشد عملکرد بهتری خواهد داشت.
- با توجه به جنبه های تاریخی و باستانی پل باید از روش هایی استفاده شود تا کمترین آسیب و تاثیر را در ظاهر پل ایجاد کند. با در نظر گرفتن این معیار شاید استفاده از ستون فولادی آن هم در نقاط مرکزی روش مناسبی نباشد. علاوه بر این استفاده از تسمه فولادی هم به میزان کمی خرابی در پل ایجاد می کند. باید گفت استفاده از ورق فولادی و الیاف FRP مناسب ترین روش ها هستند.
- در میان روش های بیان شده ورق فولادی را بدون کمترین خرابی در زیر پل می توان اجرا کرد تنها کافی است اتصال مناسبی با قوس پل داشته باشد.

۳-۶- ارائه پیشنهادات برای تحقیقات آتی

با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق می توان در جهت تکمیل و بررسی بیشتر موضوع موارد زیر را پیشنهاد نمود:

- ۱- بررسی دقت روش تحلیل انجام شده در این تحقیق در نرم افزار SAP2000 برای چند نمونه از پل های قوسی سنگی دیگر با هندسه های مختلف تا وابستگی یا عدم وابستگی روش تحلیل مزبور به هندسه پل مشخص گردد.
- ۲- مطالعه نقش مدل انتخابی برای رفتار مصالح بکار رفته در پل های قوسی سنگی مانند پل استفاده شده در این تحقیق، بر روی دقت نتایج بدست آمده از تحلیل پل ها
- ۳- بررسی اثر استفاده از روش های دیگر مقاوم سازی پل های قوس سنگی نظیر استفاده از میلگردهای طولی که وظیفه دوختن دو نقطه پل به یکدیگر را دارند، بر روی تغییر کارایی و میزان عملکرد پل
- ۴- مطالعه روشی خاص جهت کاهش تنش ها صرفا در نقاط کناری مثل لبه ها و نقاط اتصال قوس به پایه که از اهمیت بیشتری برخوردار است.

فهرست مراجع

[۱] طراحی پل (پل‌های بتن مسلح، فولادی و پیش تنیده)، طاحونی. شاپور. چاپ دهم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر-تهران، ۱۳۹۲.

[2] Innovative Bridge Design Handbook (Construction, Rehabilitation and Maintenance), Alessio Pipinato-2016

[3] AASHTO, LRFD. "LRFD bridge design specifications." *Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials* (1998).

[۴] آیین نامه بارگذاری پل‌ها (نشریه ۱۳۹). سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها- تهران، ۱۳۷۹.

[۵] افراز محبی، مریم. مدل سازی جامع سه بعدی رفتار پل های قوسی سنگی تحت بارگذاری سیلاب و زلزله، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۹.

[6] Heyman, Jacques. "The masonry arch." (1982).

[7] Robinson, Justin Ian. *Analysis and assessment of masonry arch bridges*. Diss. University of Edinburgh, 2000.

[8] Betti, Michele, Georgios A. Drosopoulos, and Georgios E. Stavroulakis. "Two non-linear finite element models developed for the assessment of failure of masonry arches." *Comptes Rendus Mécanique* 336.1 (2008): 42-53.

[9] Gilbert, Matthew. "Limit analysis applied to masonry arch bridges: state-of-the-art and recent developments." *Proceedings of 5th International Conference on Arch Bridges (ARCH'07)*, PB Lourenço, DB Oliveira, and A. Portela, eds., Funchal, Madeira, Portugal. 2007.

[10] Beuerman, Thomas E. "Inventory of repairing and strengtheing techniques for masonry arch bridges." (2009).

[11] Proske, Dirk, and Pieter Gelder. "Safety Assessment." *Safety of historical stone arch bridges* (2009): 265-331.

[12] Weber, Wilmar Karlemann. *Die gewölbte Eisenbahnbrücke mit einer Öffnung: Begriffserklärungen, analytische Fassung der Umrißlinien und ein erweitertes Hybridverfahren zur Berechnung der oberen Schranke ihrer Grenztragfähigkeit, validiert durch einen Großversuch*. na, 1999.

[13] Hughes, T. G., and M. J. Blackler. "A review of the UK masonry arch assessment methods." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and buildings* 122.3 (1997): 305-315.

[۱۴] ستایش، عبدالمتمین - فرهنگ اصطلاحات مهندسی پل، انتشارات نوروزی تهران-۱۳۹۴.

[15] Brencich, A., and C. Colla. "The influence of construction technology on the mechanics of masonry railway bridges." *Railway Engineering* 5 (2002): 6.

[16] Beyer, Lily. "Arched Bridges." (2012).

[17] Roca, Pere. *History of Conservation and Restoration, Part 1&2*. Presentation for Structural Analysis of Historical Constructions Advanced Masters, 2008.

[18] Heyman, Jacques. *The Assessment of Strength of Masonry Arches*. Arch Bridges: History, Analysis, Assessment, Maintenance and Repair, Sinopoli (ed.). Balkema, Rotterdam, 1998.

[19] KBA (2001) Kraftfahrzeugbundesamt: Festschrift 50. Jahre Kraftfahrt-Bundesamt 1951–2001. August 2001.

[20] Pircher, Martin, et al. "Schädigung einer schlaff bewehrten Betonbrücke durch Verkehrsbelastung." *Beton-und Stahlbetonbau* 104.3 (2009): 154-163.

[۲۱] راهنمای بهسازی لرزه ای پلها (نشریه شماره ۵۱۱)، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، دفتر نظام فنی اجرایی - تهران، ۱۳۹۰.

[22] AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 2014.

[23] Fanning, Paul J., and Thomas E. Boothby. "Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges." *Computers & Structures* 79.29 (2001): 2645-2662.

[24] Modena, C., et al. "Structural upgrading of a brick masonry arch bridge at the Lido (Venice)." *Proceedings of 4th International Conference on Arch Bridges, ARCH04, Barcelona*. 2004.

[25] Drosopoulos, G. A., G. E. Stavroulakis, and C. V. Massalas. "FRP reinforcement of stone arch bridges: Unilateral contact models and limit analysis." *Composites Part B: Engineering* 38.2 (2007): 144-151.

[26] Ural, Ali, et al. "Turkish historical arch bridges and their deteriorations and failures." *Engineering Failure Analysis* 15.1 (2008): 43-53.

[27] De Arteaga, I., and P. Morer. "The effect of geometry on the structural capacity of masonry arch bridges." *Construction and Building Materials* 34 (2012): 97-106.

[28] Zampieri, Paolo, Mariano Angelo Zanini, and Claudio Modena. "Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges." *Bulletin of Earthquake Engineering* 13.9 (2015): 2629-2646.

[۲۹] معرفت, محمد صادق, یزدانی, مهدی. "برآورد مقاومت نهایی یک پل قوسی بتنی غیرمسلح بر پایه نتایج محدود از تست بارگذاری." *مهندسی عمران و محیط زیست* ۴۶, ۲: ۴۶-۵۶. ۱۳۹۴.

[۳۰] کیوان نیا, اخویسی, "بررسی پل قوسی سنگی سه دهانه درودگران ملایر تحت زلزله" *هفتمین کنفرانس بین المللی مهندسی زلزله-۱۳۹۴*.

[۳۱] افراز حبیبی, مریم, محمد تقی احمدی. "تعیین بار نهایی گسیختگی پل های سنگی قوسی به کمک مدل رفتاری مناسب مصالح." *مهندسی عمران* ۳-۳: ۹-۳. (۲۰۱۳)

[32] COST-345 (2004) European Commission Directorate General Transport and Energy: COST 345 – Procedures Required for the Assessment of Highway Structures: Numerical Techniques for Safety and Serviceability Assessment – Report of Working Groups 4 and 5

[33] Heinrich B (1983) *Brücken – Vom Balken zum Bogen*. Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Hamburg.

[34] Corradi, M., and V. Filemio. "A brief comparison between mechanical aspects and construction of arch bridges during the XVIIIth and XIXth centuries." *Arch Bridges IV–Advances in Assessment, Structural Design and Construction*, P Roca & C Molins (Eds), CIMNE, Barcelona (2004): 79-86.

[35] Purtak, Frank, Karsten Geißler, and Peter Lieberwirth. "Bewertung bestehender Natursteinbogenbrücken." *Bautechnik* 84.8 (2007): 525-543.

[36] Kurrer, Karl-Eugen. *Geschichte der Baustatik*. John Wiley & Sons, 2002.

[37] Weber, Wilmar Karlemann. *Die gewölbte Eisenbahnbrücke mit einer Öffnung: Begriffserklärungen, analytische Fassung der Umrißlinien und ein erweitertes Hybridverfahren zur Berechnung der oberen Schranke ihrer Grenztragfähigkeit, validiert durch einen Großversuch*. na, 1999.

[38] Harvey, W. J., E. A. W. Maunder, and A. C. A. Ramsay. "The influence of spandrel wall construction on arch bridge behaviour." *Proceedings of the 5th international conference on arch bridges ARCH*. Vol. 7. 2007.

[39] Page, A. W. "The strength of brick masonry under biaxial tension-compression." *Int. J. Masonry Constr* 3.1 (1983): 26-31.

[40] Schlegel, Roger. *Numerische Berechnung von Mauerwerkstrukturen in homogenen und diskreten Modellierungsstrategien*. IKI, 2004.

[41] Huerta Fernández, Santiago. "Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach." (2001): 47-69.

[42] Binda, L. *Insitu General Purpose NDT and MDT Parts 1 & 3*. Presentation for Structural Analysis of Historical Constructions Advanced Masters, 2009.

[43] Hamid, Ahmad. *SA4 Unit: Inspection and Diagnosis*. Presentation for Structural Analysis of Historical Constructions Advanced Masters, 2009.

[44] Page, A. W. "The strength of brick masonry under biaxial tension-compression." *Int. J. Masonry Constr* 3.1 (1983): 26-31.

[45] Sumon, S. K. "Innovative retrofitted reinforcement techniques for masonry arch bridges." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering*. Vol. 158. No. 3. Thomas Telford Ltd, 2005.

[46] Brookes, Carl L., and Paul J. Mullett. "Service load testing, numerical simulation and strengthening of masonry arch bridges." *CIMNE, Barcelona*(2004): 10.

[47] Oliveira, Daniel V., and Paulo B. Lourenço. "Repair of stone masonry arch bridges." (2004).

[48] Tecchio, G., et al. "Static and seismic retrofit of masonry arch bridges: case studies." *Proceedings of the 6th International Conference on Bridge Maintenance and Safety (IABMAS'12), July 8–12, Stresa, Lake Maggiore, Italy*. 2012.

[۴۹] قهرمانی گرگری، اسماعیل، معرفت، محمد صادق. " بررسی راه حل های مشکلات پل تله زنگ بر مبنای نتایج آزمایش میدانی." هفتمین همایش حمل و نقل ریلی دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ۸۳

[۵۰] زهرایی، سید مهدی، آقا کوچک، علی اکبر، معرفت، محمد صادق، عطایی، شروان. " کنترل ارتعاشات پل تله زنگ به کمک میراگر جرمی تنظیم شده."

[۵۱] تقی زاده، روح الله. " بررسی روش های تعمیر و مقاوم سازی پل های طاقی سنگی راه آهن." دانشگاه تفرش، پایان نامه کارشناسی ارشد، تابستان ۱۳۹۱

Abstract

In human social life, the built bridges are considered as a symbol of human effort to overcome the natural inequalities and make faster communication ways In order to travel and transport goods. In Iran because of its long history, there are bridges which centuries have passed since their establishment. Before the arrival of modern materials such as steel and concrete, the building block of most structures including bridges, was the traditional materials found in each location, including the most common traditional materials, stone and brick. The characteristics of this material that has good compressive strength and poor tensile strength, have promoted Special forms in making of buildings built using it. One of the most common forms of structure in many of the old buildings, including the old bridge is the arc-shaped form. Because the arc can withstand the loads applied to it only by a compressive function, it's an ideal structure form for buildings made of traditional materials. One thing to note here is that, because all structures, including bridges made of traditional materials, confront various environmental factors and damages in their lifetime, the risk of failure is high and should be considered in their behavior and performance. Old structures, especially bridges can be studied from several perspectives; 1- These buildings are sometimes considered as the cultural heritage of a region or a country and In addition to cultural influences, from an economic perspective they are very effective because they attract a lot of tourists, damage caused to them could lead to irreparable losses. 2- Iran being earthquake prone and weaknesses of traditional materials to resist lateral loads 3- the fact that some of these old bridges are still used on road or rail transport network in Iran.

Given the importance of studying the bridge made of masonry materials and the fact that field studies on these buildings are very difficult, expensive and sometimes impossible and due to advances done in computer and computational sciences and presentation of structural analysis softwares, providing a model of the bridge made with masonry materials that is able to properly explain their behavior is very useful for The next steps of retrofitting and repair of bridges. In this thesis, the effectiveness of retrofitting stone arch bridge Using steel straps and plates, in the arch of the bridge in both gravity loads and seismic loadings, is evaluated using finite element modeling in the software SAP2000. The results of this study shows that using steel plate confined to the arc chamber, can severely decrease stresses and deformations of the bridge under gravity and earthquake loads. Based on the Calculations, even though this method uses more expensive materials than the FRP wrapping method, it is more effective and requires less construction operation than the other method.

Keywords: arched stone bridge, modeling, finite element method, software SAP2000, retrofitting



Ministry of Higher Education, researchers and technology

Tafresh University

Civil Engineering Department

**A Thesis For Technical and Economical Comparison Between Conventional
Methods Of Seismic Rehabilitation Of Stone Arch Railroad Bridge**

Supervisor

Dr. Mohammad ghasem sahab

Advisor

Eng. Rohollah Taghizade

By

Seyed Mohammad Reza Mirarefin

February 2017