٩٣٢٧٠

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی‌عمران (زلزله)

مقاوم‌سازی لرزه‌ای پلهای مصالح‌بنایی به روش پس‌تنیدگی

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

شهرام احمدوند

استاد راهنما : دکتر ناصر خاجی

استاد مشاور: دکتر مسعود سلطانی محمدی

WAV /۲/ ۵

بهار ۸۶

۹۳۲۷۰

بسمه تعالی

تاییدیه هیات داوران

آقای شهرام احمدوند پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان مقاوم سازی لرزه ای پلهای مصالح بنایی به روش پس تنیدگی** در تاریخ ۱۳۸٦/۲/۲۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی زلزله پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر ناصر خاجی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر مسعود سلطانی محمدی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر فرهاد دانشجو	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محسنعلی شایانفر		
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر فرهاد دانشجو	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی- پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در مهندسی عمران رشته مهندسی زلزله است که در سال ۸۶ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم / جناب آقای دکتر ناصر خاجی مشاور سرکار خانم / جناب آقای دکتر مسعود سلطانی محمدی و مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر _____ از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تادیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگا می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالعه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهند به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل و جه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروشو تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب بهرام احمدوند دانشجوی رشته مهندسی عمران مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی

تاریخ و امضاء:

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشند.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

تقدیر و تشکر

خداوند را شاکرم، به خاطر اینکه به من لذت حیات و توفیق کسب علم عطا کرده است. با تشکر از استاد محترم، جناب آقای دکتر ناصر خاجی که بعنوان استاد راهنما در این پایان‌نامه از زحمات و راهنمائی‌های مفید ایشان بهره‌گرفتم. همچنین از آقای دکتر مسعود سلطانی محمدی استاد محترم مشاور به خاطر راهنمائی‌های کارگشای ایشان کمال سپاسگزاری را دارم. صحت، سلامت و موفقیت در تمام مراحل زندگی برای شما آرزومندم.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

۱- مقدمه

۱-۱- تاریخچه ۱

۱-۲- اصول اساسی ۳

۱-۳- مرور ادبیات ۴

۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۶

۱-۵- اهداف تحقیق ۷

۲- مرور کلی براجزاء و رفتار پلهای قوسی مصالح بنایی

۲-۱-۱- کلیات ۹

۲-۱-۲- ساختار طاقها ۱۰

۲-۱-۳- قطر طاقها ۱۳

۲-۱-۴- معرفی نیروها در طاقها ۱۳

۲-۱-۵- ساختار طاقهای کوچک، متوسط و بزرگ ۱۶

۲-۲- رفتار پلهای قوسی مصالح بنایی تحت اثر بار ۱۷

۲-۳- روشهای تحلیل ۱۹

۲-۳-۱- روشهای دقیق ۱۹

۲-۳-۱-۱- روشهای الاستیک ۱۹

۲-۳-۱-۲- روشهای غیرخطی ۲۰

۳- آشنایی با روشهای مقاوم‌سازی

۳-۱- هدف و مراحل مقاوم‌سازی ۲۶

۳-۲- روشهای تقویت اجزای پلهای سنگی قوسی ۲۷

۳-۲-۱- روش *Retro-reinforcement* ۲۷

۳-۲-۲- روش پس‌تنیدگی ۲۸

۳-۲-۲-۱- تئوری پس‌تنیدگی برای تقویت اعضای قائم بنائی ۲۸

۳-۲-۲-۲- تئوری پس‌تنیدگی برای تقویت طاق قوسها ۳۰

۳-۳- طراحی سیستم‌های تقویت و نگهداری ۳۲

۳-۳-۱- تقویت مادهٔ ناپیوسته به وسیله پیچ ۳۳

۳-۳-۲- افزایش مقاومت کششی یک صفحه ناپیوستگی ۳۴

۳-۳-۳- افزایش مقاومت برشی یک صفحه ناپیوستگی ۳۵
۴- مدلسازی پلهای قوسی مصالح بنایی
۴-۱- شناخت رفتار مصالح بنایی ۳۸
۴-۱-۱- رفتار سنگها و تأثیر تنشها ۳۸
۴-۱-۲- انواع شکست در سنگ و معیار موهر کولمب ۴۰
۴-۱-۳- ملات بعنوان جزء اتصال ۴۲
۴-۱-۳-۱- شرایط تسلیم برای تنش مسطح ۴۵
۴-۲- انواع خرابی در مصالح بنایی ۴۶
۴-۲-۱- گسیختگی واحدهای مصالح بنایی ۴۶
۴-۲-۲- گسیختگی‌های مربوط به ملات ۴۶
۴-۳- پارامترهای موثر در مدلسازی ۴۷
۴-۴- تأثیر مواد (مصالح) بنایی ۴۸
۴-۵- توسعه روشهای مدل سازی برای پلهای قوسی مصالح بنایی ۵۱
۴-۵-۱- روش تحلیل، مکانیزم (فرمولاسیون یک برنامه خطی) ۵۳
۴-۶- قوسهای چنددهانه‌ای ۵۶
۴-۷- قوس های چند حلقه‌ای ۵۶
۴-۸- مصالح بنایی در دیوارهای پیشانی ۵۷
۵- آشنایی با نرم افزار *3DEC*
۵-۱- مراحل انجام تحلیل عددی ۶۰
۵-۲- معرفی نرم افزار مورد استفاده در تحقیق ۶۴
۵-۲-۱- مقایسه با دیگر روشها ۶۵
۵-۲-۲- مدل درزه لغزشی کلمب ٦٨
۵-۲-۳- حرکت بلوک صلب ۷۰
۵-۳- خصوصیات مصالح ۷۱
۵-۳-۱- خصو صیات بلوک ۷۱
۵-۳-۱-۱- دانسیته جرمی ۷۱
۵-۳-۱-۲- قابلیت تغییر شکل پذیری ذاتی ۷۲
۵-۳-۱-۳- مقاومت درونی ۷۳
۵-۳-۱-٤- خصوصیات پس از خرابی ۷۳

۵-۳-۲- خصوصیات اتصال(درزه‌ها) ۷۴
۵-۳-۳- خصوصیات مقاوم‌سازی ۷۴
۵-۳-۳-۱- رفتار محوری تقویت ۷۴
۵-۳-۳-۲- رفتار برشی ۷۶
۵-۳-۳-۳- فرمولاسیون عددی ۷۷
۵-٤- جوانب مختلف مدلسازی یک سی‌ستم ناپی‌وسته ۷۹
۶- مثالهای عددی از کاربرد برنامه *3DEC*
۶-۱- مثالهای مقایسه‌ای ۸۱
۶-۱-۱- بلوک واقع بر درز تحت اثر نیروهای افقی و قائم ۸۱
۶-۱-۲- منشور شامل درز مورب تحت فشار قائم ۸۹
۶-۱-۳- تیر طره با تکیه گاه مفصل برشی ۹۱
٦-۱-٤- دیوار مصالح بنایی با درزه‌های خشک، تحت اثر بار درون صفحه ۹۸
۷- تحلیل و مقایسه نتایج
۷-۱-پل قوسی مصالح بنای‌ی تحت اثر بار استاتی‌کی ۱۰۴
۷-۲- مدلسازی المان مجزا و رفتار لرزه‌ای قوسهای مصالح بنایی ۱۰۹
۷-۲-۱- تحلیل تحت اثر ثقل ۱۰۹
۷-۲-۲- تحلیل دینامیکی ۱۱۴
۷-۲-۲-۱- مقایسه نتایج تحلیل قبل و بعد از مقاوم‌سازی ۱۱۵
۸- نتایج و پیشنهادات
۸ -۱- نتایج ۱۲۴
۸-۲- پیشنهادات ۱۲۴
فهرست منابع ۱۲۶
واژه‌نامه انگلیسی به فارسی ۱۲۹

فهرست شکلها

عنوان صفحه

شکل۲-۱: قسمتهای مختلف پلهای قوسی مصالح بنایی ۹
شکل۲-۲: قسمتهای مختلف طاق قوس ۱۰
شکل۲-۳: طاقهای سبک کننده که در طول اجرا شده‌اند ۱۱
شکل۲-۴: نحوه استقرار طاقهای فرعی روی طاق اصلی ۱۲
شکل۲-۵: مقطع عرضی از پلهای دارای طاقهای سبک کننده ۱۲
شکل۲-۶: نمایش قطر تئوری در قسمتهای مختلف طاق ۱۳
شکل۲-۷: دیاگرام نیروهای وارده به طاق ۱۳
شکل۲-۸: نقطه اثر نیروها در هسته مرکزی ۱۴
شکل۲-۹: مکانیزم شکست طاق ۱۵
شکل۲-۱۰: ضخامت در نقاط مختلف طاق ۱۶
شکل۲-۱۱: نحوه اجرای طاق در طاقهای بزرگ و متوسط ۱۷
شکل۲-۱۲:نیروهای وارده به سازه پل و عکس العمل نسبت به بارهای وارده ۱۷
شکل۲-۱۳: (الف)ستون فولادی،(ب)پایه بنایی،(ج)منحنی رفتاری ۲۱
شکل۲-۱۴: (الف) ستون بنایی، (ب) طاق قوس بنایی ۲۲
شکل۲-۱۵:نیروهای تعادل و مکانیسم خرابی ۲۳
شکل۳-۱: مراحل مختلف مقاوم‌سازی ۲۶
شکل۳-۲: مسلح کردن به روش *Retro-reinforcement* ۲۷
شکل۳-۳: مقاوم سازی به روش پس تنیدگی ۲۸
شکل۳-۴: مقاوم سازی طاق پل مصالح بنایی به روش پس‌تنیدگی ۳۰
شکل۳-۵: انواع جابجایی در ناپیوستگی‌ها ۳۴
شکل۳-۶: مواردی که در آنها مقاومت کششی پیچ ضروری است ..... ۳۵..
شکل۴-۱: نمودار تنش_کرنش در سنگها تحت فشار همه جانبه ۳۸
شکل۴-۲: رفتار سنگ تحت تنشهای نامساوی ۳۹
شکل۴-۳: رفتار سنگ در شکست تحت اثر فشارهای محوری ۴۰
شکل۴-۴: مقاومت سنگ و رابطه موهر کولمب ۴۱
شکل۴-۵: المان درز(ملات) و سازه آجری ۴۲

شکل۴-۶: جزء اتصال الاستو پلاستیک در یک مدل ترکیبی از المانهای خرپایی ۴۳
شکل۴-۷: نمودار تنش - کرنش در اجزاء خرپایی اتصال ملاتی ۴۳
شکل۴-۸: جزء اتصال(المان درز) تحت تنش ۴۴
شکل۴-۹: انواع خرابی در مصالح بنایی ۴۶
شکل۴-۱۰: ضریب پنالتی در گسیختگی فشاری ۴۷
شکل۴-۱۱: شیوه های مدلسازی مصالح بنایی *Lourenco, 1996* ۴۸
شکل۴-۱۲: رفتار مواد ترد تحت اثر بارهای کششی و فشاری ۵۱
شکل۴-۱۳: قوس با مکانیزم چهار مفصلی ۵۲
شکل۴-۱۴: قوس شامل n بلوک تحت اثر بار ۵۳
شکل۴-۱۵: جابجایی و اجزای نیرو در بلوکهای طاق ۵۴
شکل۴-۱۶: زوایایی چرخش بلوک در زیر و روی طاق ۵۵
شکل۴-۱۷: حرکات محتمل بلوکهای مجاور در طاق قوس ۵۶
شکل۴-۱۸: بار تخریب در یک پل قوسی چند حلقه‌ای ۵۷
شکل۴-۱۹: پل چند دهانه ای مدل بولتن که تحت بار *345kn* فرو می‌ریزد ۵۸
شکل۵-۱: مدل درزه لغزشی کلمب برای حالت چسبندگی صفر ۷۰
شکل ۵-۲: رفتار محوری سیستم تقویت موضعی ۷۵
شکل ۵-۳: رفتار برشی سیستم تقویت ۷۶
شکل۵-۴: هندسه مقاومسازی پس از جابجایی برشی ۷۷
شکل۵-۵ : فنرهای محوری و برشی در مقاوم‌سازی سازی ۷۸
شکل۶-۱: بلوک واقع بر درز ۸۱
شکل۶-۲: نمودار $((\tau - u)$ در مدل درز *SDCJ* ۸۳
شکل۶-۳: بلوک واقع بر روی درز ۸۴
شکل۶-۴: مقادیر تنش برشی و جابجایی برش در نقاط گرهی بلوک ۸۵
شکل۶-۵: نمودار $(\tau - u)$ در مدل *3DEC* ۸۵
شکل۶-۶: مقادیر تنش برشی و جابجایی برشی در مرحله دوم بارگذاری ۸۶
شکل۶-۷: نمودار $(\tau - u)$ در مدل *3DEC* ۸۶
شکل۶-۸: مقادیر تنش برشی و جابجایی برشی در مرحله سوم بارگذاری ۸۷
شکل۶-۹: نمودار $(\tau - u)$ در مدل *3DEC* ۸۷
شکل۶-۱۰: مقادیر تنش برشی و جابجایی برشی در مرحله چهارم بارگذاری ۸۸

شکل۶-۱۱: نمودار $(\tau - u)$ در مدل $3DEC$ ۸۸
شکل۶-۱۲: منشور شامل درز مایل ۸۹
شکل۶-۱۳: منشور شامل درز مایل در برنامه $3DEC$ ۹۰
شکل۶-۱۴: نتایج تحلیل مثال ۶-۱-۲ با برنامه $3DEC$ ۹۱
شکل۶-۱۵: تیر طره‌ای با تکیه گاه مفصل برشی ۹۱
شکل۶-۱۷: مدل تیر طره‌ای در برنامه $3DEC$ ۹۳
شکل۶-۱۸: تعداد برخورد در انتهای تیر طره ۹۳
شکل۶-۱۹: مقادیر تنش نرمال در انتهای تیر ۹۴
شکل۶-۲۰: مقادیر سرعت و جهت تغییر مکان در طول تیر طره ۹۴
شکل۶-۲۱: مقادیر تغیر مکان برشی انتهای تیر طره ۹۵
شکل۶-۲۲: موج نیم سینوسی با زمان تداوم ۰,۲ ثانیه ۹۶
شکل۶-۲۳: مقادیر تغیر مکان در تکیه گاه مفصل برشی ۹۷
شکل۶-۲۴: سرعت و جهت تغیر مکان نقاط مختلف تیر ۹۷
شکل۶-۲۵: مقادیر تغییر مکان در برنامه تدوین شده ۹۷
شکل۶-۲۶: مقادیر تغییر مکان در برنامه $SAP2000$ ۹۷
شکل۶-۲۷: دیوار مصالح بنایی تحت بارهای درون صفحه‌ای ۹۸
شکل۶-۲۸: ثبت وقایع اصلی آزمایش ۹۹
شکل۶-۲۹: نتایج روش عددی و آزمایشگاهی ۱۰۰
شکل۶-۳۰:تغییرمکان نقطه $(0.1,0.9,0.1)$ ۱۰۰
شکل۶-۳۱:تنش برشی در جهت محور x ۱۰۰
شکل۶-۳۲: مقادیر تغییرمکان المانهای دیوار ۱۰۰
شکل۶-۳۳: مکانیزم خرابی دیوار ۱۰۰
شکل۶-۳۴: توزیع تنش در مرحله نخست ۱۰۱
شکل۶-۳۵:توزیع تنش در مرحله شکست ۱۰۱
شکل۶-۳۷: نمودار تغییر مکان- نیروی افقی در دیوار با بار قائم $100kn$ ۱۰۱
شکل۶-۳۸: پاسخ دیوار بنایی تحت تنشهای قائم به نیروی افقی درون صفحه‌ای ۱۰۲
شکل۷-۱: نمای سه بعدی پل مصالح بنایی در برنامه $3DEC$ ۱۰۴
شکل۷-۲: تغییر مکان قائم نقطه $(-3.5,6,-2.2)$ ۱۰۶
شکل۷-۳: ترک خوردگی در محل اعمال بار متمرکز ۱۰۷

شکل۷-۴: تغییرمکان نقطه مشخص در محدوده اعمال بار در حالت تقویت ۱۰۷
شکل۷-۵: تغییرمکان نقطه مشخص در محدوده اعمال بار در حالت تقویت ۱۰۸
شکل۷-۶: مدل پل مصالح بنایی..... ۱۰۹
شکل۷-۷: معرفی خصوصیات بلوکهای سنگی..... ۱۱۰
شکل۷-۸: معرفی خصوصیات اتصال ۱۱۱
شکل۷-۹: تغییر مکان سازه در تحلیل استاتیکی تحت اثر ثقل ۱۱۱
شکل۷-۱۰: تغییر مکانهای سازه در راستای x و z..... ۱۱۱
شکل۷-۱۱: مقادیر تنشهای اصلی در حالت استاتیکی ۱۱۲
شکل۷-۱۲: توزیع تنشهای برشی..... ۱۱۲
شکل۷-۱۳: مقادیرتنشهای اصلی و تنش فشاری در پایه‌ها..... ۱۱۳
شکل۷-۱۴: تمایل به مفصل شدن در پایه‌ها ۱۱۳
شکل۷-۱۵: رکورد اصلاح شده زلزله طبس ۱۱۴
شکل۷-۱۶: نقاط شاخص برای بررسی و مقایسه نتایج تحلیل..... ۱۱۴
شکل۷-۱۷: الگوی خرابی پس از اعمال بار زلزله قبل از تقویت ۱۱۵
شکل۷-۱۸: اعمال پس‌تنیدگی در سه نقطه از طاق قوس..... ۱۱۶
شکل۷-۱۹: تقویت در سه نقطه طاق قوس ۱۱۶
شکل۷-۲۰: بولت و صفحه توزیع تنش..... ۱۱۷
شکل۷-۲۱: توزیع تنش در نزدیکی یک بارمتمرکز ۱۱۸
شکل۷-۲۲: تغییر مکان در بولتها قبل از قرار گرفتن پلیتها ۱۲۰
شکل ۷-۲۳: توزیع تنش در بولتها قبل از قرار گرفتن پلیتها..... ۱۲۰
شکل۷-۲۴: مقادیر تنش برشی در بولت قبل از قرار گرفتن پلیتها ۱۲۰
شکل۷-۲۵: توزیع تنش در بولت بعد از قرار گرفتن پلیتها..... ۱۲۱
شکل۷-۲۶: تنش برشی بعد از قرار گرفتن پلیتها..... ۱۲۱
شکل۷-۲۷: تغییرمکان نقطه (0,10,–2.2) در بالاترین نقطه پل قبل از مقاوم‌سازی ۱۲۲
شکل۷-۲۸: تغییرمکان نقطه (0,10,–2.2) در بالاترین نقطه پل بعد از مقاوم‌سازی..... ۱۲۲

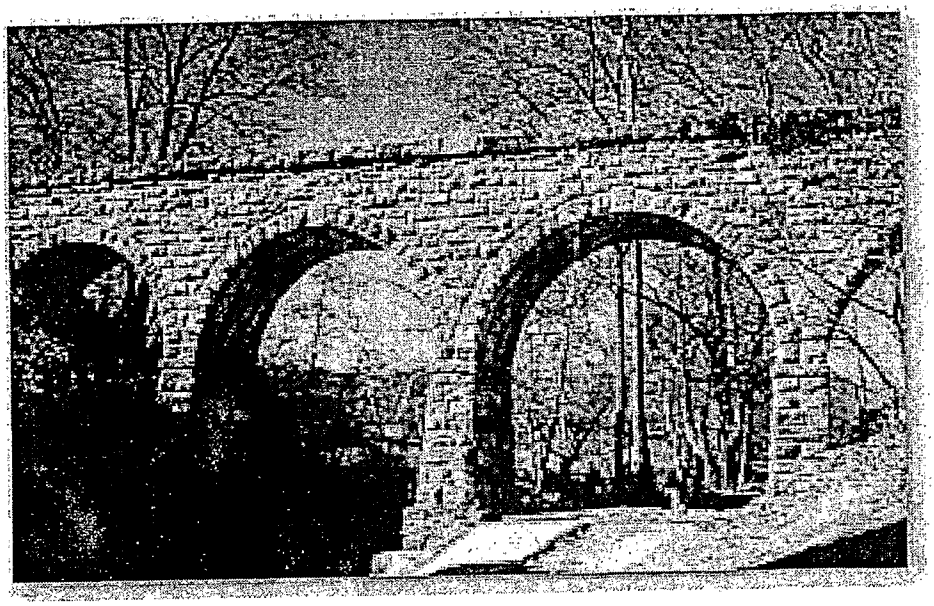
فهرست جداول

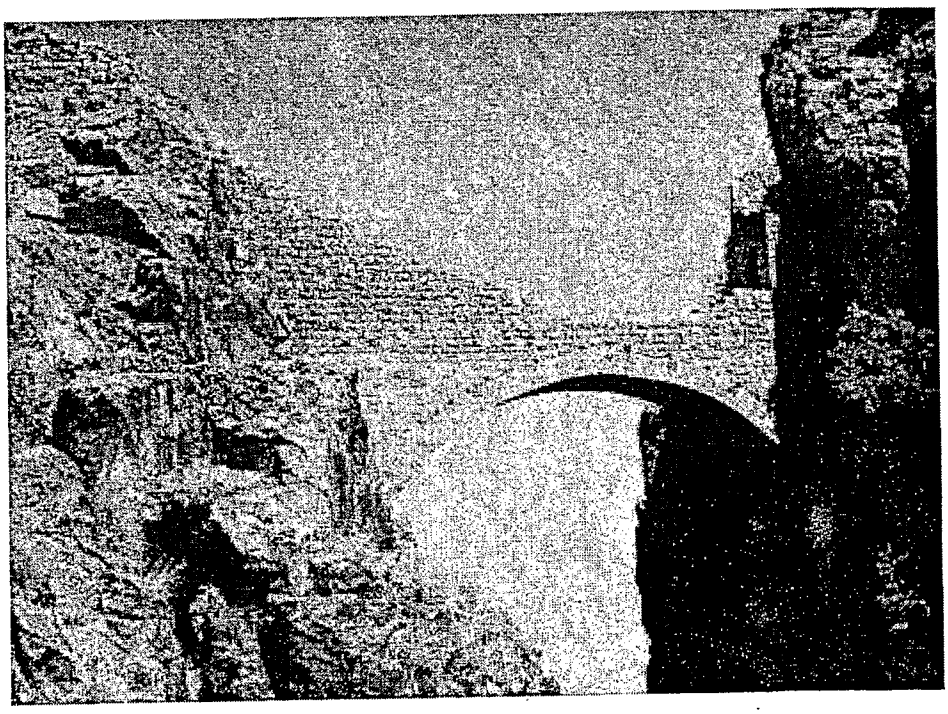
عنوان صفحه

جدول۳-۱: دیاگرام تنشها در حالات مختف اعمال نیرو ۳۱
جدول۴-۱: خصوصیات مصالح جزء اتصال برای شرایط تسلیم ۴۵
جدول۴-۲: پارامترهای مؤثر در مدلسازی ۴۸
جدول۵-۱: طیفی از حالتهای مدلسازی ۶۰
جدول۵-۲: مدلهای رفتاری ماده سنگ در $3DEC$ ۶۷
جدول۵-۳: مدلهای رفتاری ناپیوستگی در $3DEC$ ۶۷
جدول۵-٤: ثابتهای الاستیک چند نمونه سنگ ۷۲
جدول۶-۱: مقادیر نیروی F_y و F_z ۸۳
جدول۶-۲: نتایج حاصل از تحلیل توسط برنامه $3DEC$ ۹۰
جدول۶-۳: نتایج تحلیل استاتیکی تحلیل عددی تیر طره ۹۲
جدول۶-۴: نتایج مدل تیر طره در برنامه $SAP2000$ ۹۵
جدول۶-۵: مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی تیر طره ۹۶
جدول۶-۶: نتایج تحلیل دینامیکی تیر طره ۹۷
جدول۶-۷: مقایسه بارهای فرو ریزش دیوار با بار قائم $100kn$ ۱۰۱
جدول۶-۸: مقایسه بارهای فرو ریزش دیوار مصالح بنایی ۱۰۲
جدول۷-۱: تغییر مکان نقطه $(-3.5,6,-2.2)$ در حالات مختلف تقویت ۱۰۸
جدول۷-۲: مقایسه مقادیر ماکزیمم تغییر مکان در بالاترین نقطه پل ۱۲۳
جدول۷-۳: نتایج پارامترهای مؤثر را در سایر نقاط پل ۱۲۴

فصل اول:

مقدمه





۱-۱- تاریخچه:

تاریخ قوسهای مصالح‌بنایی به عهد عتیق بازمی‌گردد، این سازه‌ها با گذشت زمان در مسیر توسعه تکنولوژی تغییرات زیادی یافته‌اند. نمونه‌های بسیار خوبی جهت اثبات پایداری و مقاومت قوسها هم از لحاظ ساختاری و هم به لحاظ زیبا شناختی آنها وجود دارد. یکی از موارد استفاده قوسهای بنایی که اخیراً توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است کاربرد آن در پل‌سازی است. در انگلستان به تنهایی بیش از چهل هزار نمونه از این سازه‌ها که شامل پلهای کوچک و بزرگ می‌باشند که در مسیر راه‌ها و خطوط راه‌آهن هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پلها زمانی ساخته‌شده‌اند که ترافیک پر سر و صدا و شلوغ امروزی توسط طراحان آن زمان قابل تصور نبود.[1]

ایرانیان نیز از قوسها به عنوان عناصری مؤثر در پلها بهره می‌بردند. در خوزستان و لرستان بقایایی از چند پل قوسی با قدمت بیش از دو هزار سال وجود داردقوسهای مورد استفاده در ایران بر خلاف اروپا عموماً از خشت وگل بصورت سهمی ساخته می‌شدند، در حالیکه اکثر قوسهای اروپایی به‌خصوص رومی‌ها، بصورت نیم دایره ساخته شده‌اند. در ایران پس از ورود اسلام کار ساخت پلها ادامه یافت، ولی با توجه به طبیعت عموماً خشک مناطق ایران و کم بودن رودخانه‌ها تعداد آنها در مقایسه با کشورهای اروپایی کمتر می‌باشد. با این حال در دوره صفویه پلهای زیبایی ساخته شدند که می‌توان از پلهای زاینده رود اصفهان نام برد که همچنان زیبا و با دوام پابرجا مانده و قابل استفاده می‌باشند. پس از این دوره به خاطر رکود اقتصادی و علمی کشور پل قابل توجهی در ایران ساخته نشد، این امر تا ورود راه‌آهن به ایران ادامه داشت. بر اساس فهرست کتاب‌شناسی که توسط دانشگاه کاردیف ارائه شده‌است حدود ۲۰۰ کتاب درباره علم زیباشناسی پل وجود داشته‌است. اما عدم وجود اطلاعات مکتوب درباره جنبه‌های مختلف زیبایی شناختی پلهای مصالح بنایی تعجب برانگیز است. شاید این به آن دلیل است که این پلها بسیار عادی هستند، یا اینکه شاید ظاهر پلها جدای از سازه آنها نیست.

شکل اصلی پلهای مصالح بنایی، چه سنگی و چه آجری، در جهان در حال پیشرفت از روم گرفته تا جهان اسلام و اروپای قرون وسطی زمانی که کلیسا اسرار پلهای مصالح بنایی را احیاء کرد، پایدار مانده‌است. درحقیقت پل‌سازی و کلیسا سازی بسیار به هم مرتبط بوده‌اند. **St.Benezet** که پل واقع در **Avignon** را ساخته بسیار معروف است، پاپ رئیس انجمن راهیان پل‌سازی نیز هنوز تحت نام **Pontifex Maximus** شناخته شده می‌باشد.

قابل توجه است که نواحی غیر مذهبی در قرن ۱۹میلادی پل مصالح بنایی کمتری دارد. ایالات متحده به‌طور تعجب آوری عاری از پلهای مصالح بنایی قدیمی است.

رویکرد علمی به طراحی پل با رنسانس ایتالیایی در قرن ۱۵ آغاز شد، که حاصل آن قوس قطعه- قطعه و قوسهای زنجیره‌ای بود. اما به‌طور رسمی این رویکرد در فرانسه و در قرن ۱۸ توسط هابرت گارتر[1] در کتاب مشهور خود[2] که در سال ۱۷۱۶ چاپ شد آغاز گردید. این رویکرد بعدها باعث جدایی نما و ظاهر از سازه شد. این دیدگاه هنر گرایانه[3] با مدرن‌سازی در تضاد بود و احتمالاً همین امر مهندسان را از زمینه‌های زیباشناختی جدا و این عقیده را که پلها فقط مربوط به مهندسی می‌باشند، رواج‌داد.علاقه هیتلر به ساخت قوسهای مصالح‌بنایی برروی شاهراه‌ها احتمالاً به این عقیده کمک می‌کند.

جریان تجدید واحیای پلهای قوسی در ابتدای قرن ۲۰ همراه با دیگر اشکال ساخت و ساز توسعه یافت. در این دوره رقابت سنگینی برای ساخت قوسهای مصالح بنایی با قابلیت تحمل بار بالا شروع شد، که منجر به ساخت شمار زیادی از پلهای قوسی مصالح بنایی آجری و سنگی گردید. در این میان توصیه نامه‌هایی برای اجرای قوسهای مصالح بنایی با قابلیت باربری بالا ارائه شد. پلهای با قدمت ۲۰۰۰ ساله که هنوز پابرجا و قابل استفاده مانده‌اند، مقاومت بالای مصالح بنایی به خصوص مصالح سنگی مانند گرانیت، سهولت تعمیرات و اهمیت تأثیرات محیطی بر سازه این پلها از عوامل مهم تجدید علاقه به پلهای قوس مصالح بنایی به شمار می‌رود.

---

[1] - Hubert Gautier
[2] - Trait des punts
[3] - Beaux Art view

۱-۲- اصول اساسی:

اصول عمده‌ای در مورد اجزاء، مواد و همچنین در مورد شکل ساختاری وجود داشته است که درزیر به آنها اشاره می‌شود، در طول این دوران تأثیرشان اثبات شده است:

۱- قطعه سنگها جزء اصلی سازه هستند، که در یک حلقه[1] قرار می‌گیرند.

۲- تکیه‌گاه بنایی در قوسهای واقعی نقش اساسی در جلوگیری از بازشدگی بلوکهای بنایی دارد.

۳- بلوکهای سنگی سه‌بعدی بوده و به آسانی هندسه پل را تشکیل می‌دهند.

۴- جانپناه پل معمولاً جزء اصلی سازه نبوده و بیشتر به نمای پل جلوه زیبایی می‌دهد.

۵- قوسهای نیم‌دایره، نوک‌دار، بیضی وسهمی شکل بنا به ارتفاع و دهانه کاربرد مختلفی دارند.

۶- قوسهای نیم‌دایره ساده‌ترین نوع قوس هستند که در آن از قطاعهای سنگی بزرگ استفاده می‌شود، دیوارهای پیشانی[2] بعنوان یک توده برای جلوگیری از شکستگی عمل می‌کنند. قوسهای نوک‌دار یک شکل سهمی وار به ما می‌دهند که بیشتر بار را به طرف پایین می‌دهد. عمق قطاع‌ها نباید از ۱/۱۰ دهانه-ها کمتر باشد، به طور نسبی پهنای پایه‌ها در پلهای چند دهانه تقریباً برابر با دهانه پل هستند، چرا که توده تماس فشرده با زمین از آب شستگی جلوگیری می‌کند. چنین پلهای چند دهانه‌ای به نظر می‌رسید که رودخانه را مسدود می‌کنند.

۷- قوسهای زنجیره‌ای بسیار قابل انعطاف بودند، لذا این پلها طول دهانه را باخمیدگی بیشتری پوشش می‌دادند. این پلها زمانی مفید هستند که پی‌ها بسیار ضعیف باشند، ولی فقط برای پلهای پیاده‌رو قابل استفاده‌اند. نمونه‌های زیادی از این پلها در شهر ونیز مشاهده می‌شود.

۸- پلهای قوسی بنایی اغلب در گذشته توسط لایه‌های سنگی تزئین شده‌اند، اما امروزه این امر کمتر ترجیح داده می‌شود. جزئیات بیشتر برای یک ظاهر رضایت‌بخش نیاز به استادی بیشتر دارد. تراشیدن سنگها بسیار مهم است و باید با ماهیت سنگ جور دربیاید. امروزه تکنیکهای مناسبی برای پرداخت

---

[1] - Ring
[2] - Spandrel Wall

مناسب سنگ به کار برده می‌شود، تکنیکهای محلی و سنتی مثل تراشیدن سنگ بادست محدود به کارهای حفاظتی و تعمیرات پلهای تاریخی شده است.

قوسهای بنایی با قابلیت باربری بالا باید تا حد امکان شکل ساده‌ای داشته باشند، ستونهای تزئینی غیر ضروری است. در صورت لزوم تزئینات باید متناسب با نوع سنگ باشد.

قابل ذکر است با ورود به عصر ماشین یک نیاز ضروری برای ایجاد سیستم جاده‌ای وضوح می‌یابد، در این میان سنگ تبدیل به قلمرو معماران شد، حرفه‌ای که همراه با رشته مهندسی بوجود آمد.

در حالیکه مهندسان جدای از راه‌حلهای عملی نبوده‌اند، معماران آزادی عمل داشتند و در واقع ملزم به توجه به جنبه‌های زیباشناختی بودند. پلهای قوسی مثال خوبی برای مسائل زیبا شناختی است، در میانه های قرن نوزدهم طرح‌ریزی برای پارکهای شهری این پلها بطور جدی مورد توجه قرارگرفت. اکثر پارکها دارای یک پدیده آبی بودند، و این این دریاچه‌ها و رودخانه‌ها نیاز به یک محل عبور داشتند. پلهای قوسی بنایی که بهتر با موقعیت طبیعی منطقه سازگار می‌شدند خیلی مورد توجه قرارگرفتند.

اما بهترین نمونه از کاربرد پلهای قوسی مصالح بنایی در راه‌آهن قابل مشاهده است، برای ساخت این قبیل پلها در طول راه‌آهن از بهترین سنگها استفاده شده است. اکثر این سازه‌ها هنوز پا برجا مانده‌اند. ارزیابی وسیع این سازه‌ها در حال حاضر بسیار مشکل است. در توسعه راه‌ها و راه‌آهن امروزه نیز به کرات از سازه قوسهای مصالح بنایی استفاده می‌شود و این خود یک زمینه آموزشی بسیار مهم برای مهندسان که در مسیر یادگیری قرار دارند، بطورعملی فراهم می‌کند.[2]

۱-۳- مرور ادبیات

طراحی مدرن و تئوریک پلهای قوسی از قرن هجدهم میلادی آغاز شد. در این دوره آزمایشهای تجربی جهت شناخت رفتار پل توسط محققین انجام گرفت. قبل از قرن هجدهم طراحی پلها بر اساس روابط تجربی صورت می‌گرفت. ناویر (۱۸۲۶) و بارلو(۱۸۴۶) از نخستین کسانی بودند که برخی قوانین کلی

را به‌صورت تئوریک برای طراحی پلها ارائه کردند. در سال (۱۸۷۹) کاستیگلیانو تئوری حداقل انرژی را ارئه نمود. با توسعه تئوری پلاستیسیته در اوایل قرن بیستم روش حالت حدی برای آنالیزها مورد توجه قرار گرفت. در سال(۱۹۶۳) روش مکانیسم توسط پیپارد بررسی گردید. این روشها که به روشهای پلاستیک معروف می‌باشند با گذشت زمان توسعه یافته و امروز هم بعنوان روشهای آنالیز پلهای قوسی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در تحقیقات *Dhanasekar(1985), Pande & Middelton(1991)* ، دو محیط ملات و مصالح هر کدام بطور جداگانه به صورت محیط مادی پیوسته مدل گردید. این روش تحلیل محاسبات طولانی نیاز داشت و تنها برای مدلسازی نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی مناسب است.

در اواسط قرن بیستم روش اجزاءمحدود برای تحلیل پلهای‌قوسی نیز مورد استفاده قرارگرفت. با توسعه شیوه‌های عددی، روش اجزاء محدود[1] به عنوان ابزار مناسب برای آنالیز پلهای قوسی مورد توجه قرارگرفت. با توجه به طبیعت ناپیوسته پلهای قوسی‌بنایی از آن پس روشهایی باعنوان اجزاء مجزا[2] که درآن مدلها به‌صورت غیر پیوسته به کار گرفته می‌شد، ارائه گردید. با پیشرفت سریع کامپیوترها و توانایی انجام محاسبات پیچیده در زمان کوتاه سبب پیدایش نرم‌افزارهای مبتنی بر روشهای عددی با مطابقت بیشتر مدلها با رفتار واقعی این گونه سازه‌ها شوند.[3]

در روشهای مبتنی بر ایده‌های المان مجزا واحدهای مصالح یعنی آجر و سنگ بصورت محیط پیوسته و بندهای ملات با المانهای تماسی مدل می‌شود. کارهای نخستین این روش توسط *Page(1978)* و *Arya& Hege mier(1978)* و اخیراً نیز توسط *Rots(1991)*، *Lourenco(1996)* به انجام رسید.

این روش تحلیل برای سازه‌های با مقیاس بزرگ، حجم وسیع محاسبات را می‌طلبد. اما قطعاً یک ابزار تحقیقاتی ارزشمند است که می‌تواند جایگزین آزمایشات وقتگیر و پر هزینه باشد.

---

[1] - Finite Element Method
[2] - Discrete Element Method