بسم الله الرحمن الرحیم

وزارت علوم تحقیقات و فن آوری

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی عمران -سازه

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی روشهای تعمیر و مقاومسازی پلهای طاقی سنگی راه آهن

اساتید راهنما:

آقای دکتر محمد قاسم سحاب

آقای دکتر اردشیر دیلمی

دانشجو:

روح الله تقی زاده

تابستان 1391

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند....

تقدیم به یگانه مظهر دوستی، همسر مهربان و فداکارم که سایه مهربانیش سایه سار زندگیم می باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و در مسیر ناهموار زندگی و تحصیل همواره مرا یاری نموده.

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 اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد قاسم سحاب و آقای دکتر اردشیر دیلمی 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

پلهای طاقی سنگی از جلوه های با شکوه و بارز معماری در راه آهن ایران می باشند و از آنجایی که اکثر این پلها دارای ارزش تاریخی بوده و از جمله میراث فرهنگی محسوب می شوند و از طرفی به علت اینکه برخی از این پلها از جمله بزرگترین پلهای شبکه راه اهن می باشند، نگهداری، مرمت و مقاومسازی آنها امری ضروری و اجتناب ناپذیر می باشد..

در سالهای اخیر با نیاز روز افزون تقاضای حمل بار و مسافر، افزایش بار محوری خطوط تا 25 تن امری ضروری بوده و یکی از گلوگاههای اصلی این هدف، با توجه به اینکه غالبا طراحی اولیه پلها بر مبنای بار محوری کمتر از 20 تن می باشد ظرفیت باربری پلهای موجود است. در این تحقیق پس از معرفی کامل این پلها، عیوب و آسیبها، روشهای تحلیل و همچنین نرم افزارهای موجود نسبت به بررسی انواع روشهای مقاومسازی و پارامترهای اجرایی آنها اقدام شده است. در نهایت پل موجود در کیلومتر 320+427 راه آهن تهران تبریز مورد بررسی و تحلیل استاتیکی خطی قرار گرفته و ضمن معرفی آسیبهای موجود در آن، با استفاده از نرم افزار sap2000-v14 و روش اجزای محدود سه بعدی مدلسازی پل صورت گرفته است.

پس از تحلیل وضعیت موجود تحت بار محوری 25 تن نقاط ضعف سازه مشخص و با استفاده از روش تسلیح خارجی سازه مقاومسازی گردیده و در نهایت ظرفیت مدل بهسازی شده با حالت قبل مقایسه شده است. میزان تاثیر گذاری مدول الاستیسته مصالح روی طاق بر مقدار و محل قرار گیری تنشهای کششی مورد بررسی قرار گرفته و مشخص گردید با افزایش نسبت مدول الاستیسته طاق به پر کننده این روش مقرون به صرفه تر می باشد و از طرفی با توجه به عدم امکان قطع ترافیک عبوری حین عملیات مقاومسازی نتایج حاکی از موثر بودن این روش در تسلیح دهانه ها 40 متری می باشد.

کلید واژه: پلهای طاقی سنگی، روشهای تعمیر و مقاومسازی، راه آهن

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: اهمیت تحقیق و معرفی آن

1-1- اهمیت موضوع تحقیق 2

2-1- هدف 2

3-1- معرفی 3

4-1- روش تحقیق 3

5-1- مروری بر فصول 4

فصل دوم: پیشینه مطالعاتی

1-2- مقدمه 5

2-2- مطالعات سالن تئاتر آسپندوس 8

3-2- مقاومسازی پل با مصالح بنایی بوسیله FRP 10

4-2- مطالعه پل تکدهانه با استفاده از اجزا محدود سه بعدی و نرم افزار دایانا 11

5-2- مقاومسازی کلیسای کنستانتین با FRP 12

6-2- مقاومسازی پل راه آهن Pop Bottle به روش Archtec 14

7-2- مطالعه پل Manari در راه آهن یونان 16

فصل سوم: بررسی انواع خرابی در پلهای طاقی سنگی راه آهن

1-3- مقدمه 17

3-2- معرفی اجزای مختلف پلهای با مصالح بنایی 17

3-3- آسیب های فونداسیون 18

3-3-1- آسیب وارد شده به علت تخریب مصالح تشکیل دهنده فونداسیون 18

3-3-1-1- فقدان عناصر حفاظتی 18

3-3-1-2- فرسایش موضعی اجزای فونداسییون 19

3-3-1-3- تجزیه کربنات کلسیم 19

3-3-1-4- ترک های نامنظم در اجزای فونداسیون 19

3-3-1-5- فرسودگی بوسیله و پوسیده شدن دستکها (شمع های چوبی).....20
3-3-1-6- خوردگی مصالح به کار رفته در فونداسیون.....20
3-3-2- آسیب های منجر به کاهش پایداری فونداسیون.....20
3-4- آسیب های سازه پل.....21
3-4-1- عوامل.....21
3-4-1-1- بار دائمی ثقلی.....21
3-4-1-2- بار زنده ثقلی.....21
3-4-1-3- نیروهای افقی به علت ترمز و نیروهای گریز از مرکز.....22
3-4-1-4- عوامل ناشی از حرارت.....22
3-4-1-5- حرکات اجزای پل.....22
3-4-1-6- عوامل دینامیکی.....22
3-4-2- مصالح.....23
3-4-1- آسیب هایی که منجر با کاهش مقاومت و ظرفیت باربری سازه می شوند.....24
3-4-1-1- آسیب های طاق پل.....24
3-4-1-2- پایه ها.....26
3-4-1-3- دیواره های انتهایی.....27
3-4-1-4- اسپندرل.....28
3-4-1-5- دیواره های جانبی.....29
3-4-2- آسیب های ایجاد شده به علت دوام پایین مصالح.....30
3-4-2-1- آسیبهای سطحی.....30

فصل چهارم: رفتار سازه ای و روشهای آنالیز پلهای طاقی سنگی

4-1- اصول طراحی پلهای طاقی.....33
4-1-1- ترسیم منحنی طاق پل.....34
4-1-2- رفتار سازه ای پلهای طاقی با مصالح بنایی.....35
4-1-2-1- جریان نیرو و بار.....35

4-1-2-2- خط فشار و مکانیزم تخریب 35
4-1-3- تاثیر پر کننده (خاکریزی روی طاق) 36
4-2- بررسی روشهای تعیین ظرفیت باربری پلهای طاقی سنگی 38
4-2-1- فرآیند ارزیابی چند سطحی 39
4-3- روش MEXE 40
4-3-1- حوضه 40
4-3-2- تعیین موقت ظرفیت بار محوری 41
4-3-3- تعیین بار محوری مجاز 44
4-4- روش پاوسر جهت آنالیز قوسهای شبه دایره 45
4-4-1- حوضه 45
4-4-2- بارگذاری 46
4-4-3- روش تنش حداکثر 50
4-4-3-1- مدل قوس الاستیک (Sustainable Bridges-a-2007) 51
4-4-3-2- قوس غیر الاستیک 51
4-4-4- روش خط فشار و منطقه فشار 52
4-4-5- روشهای مبتنی بر مکانیزم 55
4-5- استفاده از نرم افزار Archie-M 56
4-5-1- قسمتهایی که در این نرم افزار قابل مدلسازی می باشند 57
4-5-1-1- طاق 57
4-5-1-2- خاکریز روی طاق 57
4-5-1-3- کوله ها 57
4-5-1-4- پایه ها 57
4-5-1-5- روسازی 58
4-5-2- مراحل مدلسازی در نرم افزار Archi-M 58
4-6- نرم افزار RING 59

4-6-1- قابلیتهای نرم افزار 60
4-6-2- مراحل مدلسازی 60
4-6-2-1- General project setting 60
4-6-2-2- Geometry 60
4-6-2-3- Partial Factors 61
4-6-2-4- Material 61
4-6-2-5- Add vehicles 61
4-6-2-6- نتایج خروجی 61
4-6-3- نرم افزارهای مبتنی بر اجزای محدود 61
4-6-3-1- فرض های کاربردی مد لسازی یک محیط مرکب بنایی 63
4-6-4- مدلسازی یک بعدی 64
4-6-5- مدلسازی دو بعدی 65
4-6-6- مدلسازی سه بعدی 68
4-7- نرم افزار Elfen 69
4-7-1- قابلیت های نرم افزار Elfen 69
4-7-1-1- توانایی های مد لسازی 69
4-7-1-2- تو انایی های تحلیل و انجام تحلیل های خمشی و صریح المان محدود و مجزا 69
4-8- نرم افزار Ansys 70
4-8-1- قابلیت های نرم افزار 71
4-8-2- مد لسازی پل در نرم افزار Ansys 71
4-8-3- معرفی المانهای مد لسازی در نرم افزار Ansys 72
4-8-3-1- المان سازه ای Plane82 72
4-8-3-2- المان Contact 12 73
4-9- Sap2000 73
4-9-1- مراحل مدلسازی 73

4-9-1-1- توابع شکل سه بعدی المان ایزوپارمتریک المان solid 76
4-10- مقایسه روشهای آنالیز 78
4-11- انواع گسیختگی های ممکن در یک محیط مصالح بنالح 78

فصل پنجم: روشهای تعمیر ، نگهداری و مقاومسازی پلهای طاقی سنگی

5-1- مقدمه 81
5-2- روشهای تعمیر و مقاومسازی پلهای با مصالح بنایی 82
5-2-1- بند کشی 83
5-2-2- روش saddling 83
5-2-3- بتن پاشی یا sprayed concrete 85
5-2-4- استفاده از قطعات پیش ساخته بتن پاشی یا sprayed concrete 86
5-2-5- استفاده از قوس کمکی Relieving arch 87
5-2-6- شبکه بندی میله های فولادی و بتن پاشی 87
5-2-7- مسلح سازی قوس توسط میله های فولادی 87
5-2-7-1- تسلیح داخلی قوس 87
5-2-7-2- تسلیح خارجی قوس 91
5-2-8- استفاده از میله های مهاری 92
5-2-9- بهسازی خاک بوسیله تزریق 92
5-2-10- بهسازی قوس بوسیله تزریق 94
5-2-11- روش Stitching 95
5-2-12- استفاده از پرکننده مسلح Rrinforced fill 97
5-2-13- اجرای اسلب روی پرکننده Relieving slab 97
5-2-14- تقویت پلهای قوسی بنایی بوسیله FRP 98
5-2-14-1- هندسه و خواص مکانیکی قوسها 100
5-2-14-2- مشخصات مکانیکی مصالح 101
5-2-14-3- رفتار قوس بنایی غیر مسلح 101

5-2-15- تقویت قوسها در قسمت درونی و بیرونی در طول کل قوس 101
5-2-16- مسلح سازی قوس درونی و بیرونی توسط طولهای تکه ای 103
5-2-17- استفاده همزان CFRP در قسمتی از قوس درونی و بیرونی 103
5-2-18- نتیجه گیری 104
5-2-19- تعویض مصالح پرکننده با بتون 105
5-2-20- روشهای بهبود خاک 105

فصل ششم: مطالعه موردی پل کیلومتر 320+427 راه آهن ایران

6-1- مشخصات عمومی پل کیلومتر 320+427 106
6-2- ارزیابی کیفی پل مورد مطالعه 107
6-3- ترمیم 117
6-3-1- حذف عامل تخریب 117
6-3-2- ترمیم خرابی ها 118
6-4- مقاومسازی 118
6-4-1- مشخصات مصالح 118
6-4-1-1- ملات 118
6-4-1-2- سنگ 119
6-4-1-3- ترکیب ملات و سنگ 119
6-4-2- بررسی تاثیر ابعاد المانها در سازه و مش بندی مدل 121
6-5- بررسی تاثیر شرایط مرزی 125
6-6- صحت سنجی نرم افزار 129
6-7- بارگذاری 130
6-7-1- بار زنده 130
6-7-2- ضریب دینامیکی 131
6-7-3- مدل بار گذاری انتخابی 133
6-7-3-1- بار مرده 133

6-7-3-2- بار زنده 133
6-7-4- مدل سازی پل مورد مطالعه 133
6-7-5- تعیین نقاط ضعف سازه 134
6-7-6- نتایج بارگذاری در مدل نوع A 135
6-7-7- تهیه طرح تقویت 142
6-7-8- تقویت مدل نوع A 142
6-7-8-1- حالت اول تسلیح سطحی طاق اصلی 142
6-7-8-2- حالت دوم تسلیح عمقی طاق اصلی 146
6-7-8-3- حالت سوم تسلیح سطحی و عمقی طاق اصلی 148
6-7-8-4- نتایج مرحله اول 149
6-7-8-5- تهیه طرح نهایی 151
6-7-9- نتایج بارگذاری در مدل نوع B 156
6-7-10- تقویت مدل نوع B 163
6-7-10-1- حالت اول تسلیح سطحی طاق اصلی 163
6-7-10-2- حالت دوم تسلیح عمقی طاق اصلی 165
6-7-10-3- حالت سوم تسلیح سطحی و عمقی طاق اصلی 167
6-7-10-4- نتایج مرحله اول 168
6-7-10-5- تهیه طرح نهایی 169
فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهاد 177
فهرست مراجع 179

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول 1-1 : آمار پلهای شبکه راه آهن به تفکیک نوع و مجموع طول (آرشیو اداره کل خط و سازه های فنی) 2

جدول 2-1 : وزن نمونه ها(Berk Boz, 2006) 9

جدول 2-2 : حداکثر تنشهای فشاری و کششی(Berk Boz, 2006) 10

جدول 2-3 : مشخصات مصالح(Constantine C. Spyrakos,2011) 13

جدول 4-1 : روشهای تحلیل مورد استفاده در نرم افزارهای کامپیوتری(Sustainable Bridges-a ,2007) 39

جدول 4-2 : محدوده دهانه(UIC-783) 41

جدول 4-3 : مقاومت فشاری و برشی ملات(UIC-783) 49

جدول 4-4 : ضریب کاهش برای مصالح و ملات(UIC-783) 49

جدول 4-5 : مدول الاستیسیته با توجه به کیفیت ملات و نوع مصالح(UIC-783) 50

جدول 4-6 : نمونه ای از نتایج روش پاوسر(UIC-783) 50

جدول 4-7 : مقایسه کاربرد روشهای مختلف تحلیل پلهای طاقی سنگی(Sustainable Bridges-a ،2007) 78

جدول 5-1 : مقاومت ملاتها و نوع کار با مصالح بنایی(European Co-operation) 83

جدول 5-2 : انواع آرماتور و frp های قابل استفاده در تسلیح قوس 88

جدول 5-3 : نوع دوغاب برحسب تراوایی 95

جدول 5-4 : مقایسه خصوصیات فیبرها، رزینها و فولاد (Pellegrino,2009) 99

جدول 6-1: تعیین مقاومت فشاری ملات(SB-LRA,2007) 118

جدول 6-2: تعیین مقاومت فشاری سنگ(SB-LRA,2007) 119

جدول 6-3: مقاومت فشاری و E مصالح بر اساس مقاومت ملات و سنگ با ارتفاع بین 20-30 (SB-LRA,2007) 120

جدول 6-4: تنشهای اصلی و برشی در گره 10995 و المان SOLID مجاور آن 124

جدول 6-5: مقادیر جابجایی در جهت عمودی برای مشهای ختلف در گره 6935 124

جدول 6-6: ترتیب ایجاد مفاصل در سازه 130

جدول 6-7: فاکتور دینامیکی برای بارگذاری RU 131

جدول 6-8: مقایسه تنشها و جابجاییها در انواع مدلهای بارگذاری 140

جدول 6-9: مشخصات تجاری انواع Helibar موجود در بازار 142

جدول 6-10: مقادیر نیروی محوری در المانهای با حداکثر مقادیر 144
جدول 6-11: مقادیر نیروی محوری در المانهای با حداکثر نیروی محوری در تسلیح عمقی سازه 147
جدول 6-12: مقادیر نیروی محوری در المانهای با حداکثر نیروی محوری در تسلیح قوس داخلی با سطح مقطع A 152
جدول 6-13: مقادیر نیروی محوری در المانهای با حداکثر نیروی محوری در تسلیح قوس داخلی با سطح مقطع B 152
جدول 6-14: محاسبه شده تنشها و جابجاییا مدل نهایی در هر سه نوع بارگذاری 155
جدول 6-15: مقایسه تنشها و جابجاییها در انواع مدلهای بارگذاری 161
جدول 6-16: مقادیر نیروی محوری در برخی از المانهای با حداکثر مقادیر در المانهای طولی 164
جدول 6-17: مقادیر نیروی محوری در المانهای با حداکثر نیروی محوری در تسلیح عمقی سازه 167
جدول 6-18: تنشها و جابجایی محاسبه شده مدل نهایی در هر سه نوع بارگذاری(2،3و4) 174
جدول 6-19: تنشها و جابجایی محاسبه شده مدل نهایی با در نظر گرفتن بار مرده و زنده در هر سه نوع بارگذاری(2،3و4) ... 176

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل 1-1: شماتیک دهانه های 40 متری پل مورد مطالعه 3

شکل 1-2: نمای پل مورد مطالعه 4

شکل 2-1: قوس مدور تحت وزن خودش خط فشار a) حداقل b) حداکثر 5

شکل 2-2: نمودار بار تغییر مکان و بررسی حالت بحرانی بار متمرکز(Pippard,1948) 6

شکل 2-3: مش بندی و المانهای آن در روش مدلسازی مایون 6

شکل 2-4: نمونه ای از پلهای راه آهن ایتالیا و تغییر شکل مود های آن(Gambarotta,1997) 7

شکل 2-5: قوس مصلح نشده مدل شده با مواد با کشش محدود با مقاومت فشاری محدود و نامحدود(Maria,2007) 7

شکل 2-6: نمای کل سالن تئاتر و ستونهای آن 8

شکل 2-7: شرایط مرزی و المانهای solid مش بندی شده(Berk Boz, ۲۰۰٦) 9

شکل 2-8 : کانتور تنش تحت نیروهای ناشی از صوت (سمت راست) و بار مرده(Berk Boz, 2006) 9

شکل 2-9: کانتور تنش تحت نیروهای ناشی از بار مرده و زلزله(Berk Boz, 2006) 10

شکل 2-10: مدل تهیه شده از قوس(Yu Zheng ,2010)..... 10

شکل 2-11: مدل اجزا محدود(Yu Zheng ,2010)..... 11

شکل 2-12: تغییر شکل a) مدل با b frp) مدل بدون frp (Yu Zheng ,2010)..... 11

شکل 2-13: هندسه و مشبندی مدل(Yunfan Cai,2011) 11

شکل 2-14: حداکثر تنشهای اصلی در مدل(Yunfan Cai,2011)..... 12

شکل 2-15: حداکثر تنشهای اصلی در تحلیل غیر خطی(Yunfan Cai,2011) 12

شکل 2-16: نمای کلی مدل(Constantine C. Spyrakos,2011)..... 13

شکل 2-17: تنشهای اصلی s11 و s22 (Constantine C. Spyrakos,2011) 13

شکل 2-18: تنشهای اصلی s11 و s22 بعد از مقاومسازی(Constantine C. Spyrakos,2011) 14

شکل 2-19: نمایی از Pop Bottle (Carl L Brookes,2004)..... 14

شکل 2-20: محل ترکهای اصلی و مقاومسازی پیشنهاد شده(Carl L Brookes,2004)..... 14

شکل 2-21: محل نصب سنسورها در پل(Carl L Brookes,2004) 15

شکل 2-22: کرنشها در سازه چپ LC8 و راست LC9(آبی مقاومسازی) (Carl L Brookes,2004) 15

شکل 2-23: مقایسه سازه مقاوم نشده و کرنشهای موجود چپ LC8 و راست LC9(Carl L Brookes,2004) 15
شکل 2-24: نمای پل مورد مطالعه و مدل تهیه شده از آن(Syrmakezis, P. G,2006) 16
شکل 2-25: تنشهای ایجاد شده در سازه(Syrmakezis, P. G,2006) 16
شکل 3-1: اجزای پلهای با مصالح بنایی(UIC-783) 17
شکل 3-2: اجزای پلهای با مصالح بنایی دارای ویادوک(Sustainable Bridges,2007) 18
شکل 3-3: اجزای مختلف تشکیل دهنده یک پل بنایی 18
شکل 3-4: آسیب فونداسیون در اثر فرسایش(UIC PROJECT,2006) 19
شکل 3-5: تخریب ایجاد شده به علت تجزیه کربنات کلسیم(UIC PROJECT,2006) 19
شکل 3-6: فرسودگی و پوسیدگی قسمتهای چوبی(UIC PROJECT,2006) 20
شکل 3-7: خوردگی اعضای فلزی 20
شکل 3-8: آبشستگی موضعی در یک پایه فونداسیون(سمت راست)و عمومی (سمت چپ) (UIC PROJECT,2006) 20
شکل 3-9: آبشستگی موضعی در پایه کناری پل(UIC PROJECT,2006) 21
شکل 3-10: قرارگیر خط روی پل به صورت غیر متقارن 21
شکل 3-11: نشست پایه ها و تخریبهای ناشی از آن(UIC PROJECT,2006) 22
شکل 3-12: تاثیر بارگذاری ضربه ای (a)و بارگذاری تکراری (b) (UIC PROJECT,2006) 23
شکل 3-13: سه مود شکست در مصالح بنایی 24
شکل 3-14: ترک طولی در طاق قوس(UIC PROJECT,2006) 24
شکل 3-15: ترک طولی بین سنگ لبه طاق و قوس(UIC PROJECT,2006) 24
شکل 3-16: ترک قطری در قوس طاق(UIC PROJECT,2006) 25
شکل 3-17: ترک عرضی در قوس طاق(تخریب با چهار مفصل) (UIC PROJECT,2006) 25
شکل 3-18: ترک عرضی در قوس طاق(تخریب با ترکیبی از چهار مفصل و برش) (UIC PROJECT,2006) 25
شکل 3-19: تخریب به علت تشکیل هفت مفصل در یک پل با دو طاق(UIC PROJECT,2006) 25
شکل 3-20: جداشدن سنگها در طاق(UIC PROJECT,2006) 26
شکل 3-21: انواع شکست مکانیکی در مصالح قوس 26
شکل 3-22: ترک عمودی پایه(UIC PROJECT,2006) 26
شکل 3-23: ترکهای پله ای در پایه(UIC PROJECT,2006) 27

شکل 3-24: ترک عمودی بین موج شکن و پایه(UIC PROJECT,2006) 27
شکل 3-25: ترک های عمودی در دیواره ها(UIC PROJECT,2006) 27
شکل 3-26: ترک افقی دیواره (چپ) و برآمدگی دیواره های کناری پل (راست) (UIC PROJECT,2006) 28
شکل 3-27: جدا شدگی اسپندرل(UIC PROJECT,2006) 28
شکل 3-28: چرخش اسپندرل(UIC PROJECT,2006) 28
شکل 3-29: ترک های پله ای در اسپندرل 29
شکل 3-30: چرخش و تخریب دیواره های کناری(UIC PROJECT,2006) 29
شکل 3-31: ترک عمودی بین دیواره پل و دیوار جانبی(UIC PROJECT,2006) 29
شکل 3-32: ترک پله ای(UIC PROJECT,2006) 29
شکل 3-33: خزه،گلسنگ و رشد قارچ ها 30
شکل 3-34: شوره زدگی(UIC PROJECT,2006) 30
شکل 3-35: پوسته شدن(UIC PROJECT,2006) 31
شکل 3-36: هوازدگی سطحی(UIC PROJECT,2006) 31
شکل 3-37: تشکیل بافت لانه زنبوری(UIC PROJECT,2006) 31
شکل 3-38: آسیبهای ناشی از جداشدگی مصالح(UIC PROJECT,2006) 31
شکل 3-39: نمونه ای از جداشدگی مصالح(UIC PROJECT,2006) 32
شکل 3-40: ترک در اثر جابجایی و رشد گیاهان(UIC PROJECT,2006) 32
شکل 4-1: قسمتهای مختلف طاق 33
شکل 4-2: تصویر طاقهای با افتادگی کمتر از 1/2 34
شکل 4-3: تصویر طاقهای با افتادگی بزرگتر از 1/2 35
شکل 4-4: خط فشار در یک نیم قوس(UIC-783) 35
شکل 4-5: توزیع بار در قوس(UIC-783) 36
شکل 4-6: اینتر اکشن خاک و قوس(UIC-783) 36
شکل 4-7: جریان نیرو در سیستم قوس- خاک در تخریب(UIC-783) 36
شکل 4-8: مشخصات هندسی پل Prestwood 37
شکل 4-9: مکانیزم گسیختگی پل پرسوود پیشبینی شده با استفاده از روش اجزا محدود (مهدی کاکویی،1385) 37

شکل 4-10: اندر کنش نیروها قوس و پایه (Thomas E. Beuerman,2009)..... 38
شکل 4-11: روشها تعیین ظرفیت باربری..... 39
شکل 4-12: محدودیت دهانه بر اساس بیگی پل(UIC-783)..... 41
شکل 4-13: محدوده ضخامت طاق بر طبق قوانین Trautwine (UIC-783)..... 41
شکل 4-14: ضخامت طاق در تاج قوس – d=50cm سمت راست و d=65cm سمت چپ(UIC-783) 42
شکل 4-15: ضخامت طاق در تاج قوس - d=30cm سمت راست و d=40cm سمت چپ(UIC-783)..... 42
شکل 4-16: ضخامت طاق در تاج قوس -d=115cm سمت راست و d=100cm سمت چپ (UIC-783) 43
شکل 4-17: ضخامت طاق در تاج قوس – d=80cm سمت راست و d=90cm سمت چپ(UIC-783) 43
شکل 4-18: محاسبه فاکتورKP (UIC-783) 44
شکل 4-19: محاسبه فاکتورKS (UIC-783) 44
شکل 4-20: هندسه قوس(UIC-783) 45
شکل 4-21: عرض موثر(UIC-783)..... 47
شکل 4-22: تنشها و کرنشهای اعمال شده (UIC-783)..... 48
شکل 4-23: ارتباط بین مقاومت سنگ و ملات(UIC-783) 49
شکل 4-24: مدل هندسی تحلیل تنش حداکثر(Sustainable Bridges-a,2007)..... 51
شکل 4-25: شماتیک هندسه در تحلیلهای الاستیک - پلاستیک(Sustainable Bridges-a,2007)..... 52
شکل 4-26: بلوک تسلیم (Sustainable Bridges-a,2007) 52
شکل 4-27: مقایسه رفتار یک ستون فولادی و یک پایه مصالح بنایی در حالت خمیری..... 53
شکل 4-28: نمایی از خط فشار در هنگام فروپاشی دو نوع سازه بنایی 53
شکل 4-29: تشکیل مکانیزم مفصلی در طاق 54
شکل 4-30: روش مکانیزم در پلهای مصالح بنایی 55
شکل 4-31: حرکات نسبی محتمل a) چرخش حول نقطه داخلی b) حول نقطه خارجی c) سر خوردن روی همدیگر..... 56
شکل 4-32: چرخش بلوک های مجاوردر تحلیل بلوک پلاستیک-صلب(Gilbert,1998)..... 56
شکل 4-33: تحلیل به کمک نرم افزار Archie..... 56
شکل 4-34: مدلسازی پل Smardale Gill در نرم افزار Archi-M 59
شکل 4-35: خروجی گرافیکی نرم افزار Archi-M در تحلیل یک پل دو دهانه 59

شکل 4-36: تعریف مشخصات هندسی پل 60
شکل 4-37: تعریف مشخصات مصالح 61
شکل 4-38: تعریف مشخصات بار زنده 61
شکل 4-39: مدلسازی مصالح بنایی (ماکرو، میکرو و میکروی ساده شده) (Sustainable Bridges-a ،2007)..... 63
شکل 4-40: مقایسه مدلسازی میکرو و ماکرو(Claudio Maruccio,2010)..... 64
شکل 4-41: مکانیزم شکست تحت مدلسازی میکرو a و ماکرو b(Claudio Maruccio,2010)..... 64
شکل 4-42: مدلسازی یک بعدی اجزای محدود(Sustainable Bridges-a ،2007)..... 64
شکل 4-43: مدلسازی الاستیک پلاستیک یک بعدی اجزای محدود(Sustainable Bridges-a ،2007)..... 65
شکل 4-44: مدلسازی الاستیک پلاستیک ترد (Choo, 1991)..... 65
شکل 4-45: تکنیک های مدلسازی دو بعدی اجزای محدود(Sustainable Bridges-a ،2007)..... 66
شکل 4-46: رابطه تنش – کرنش در مواد شبیه بتون (Sustainable Bridges-a ،2007)..... 66
شکل 4-47: خروجی مدلسازی دو بعدی: a) توزیع تنش b) محل ایجاد ترکها(Ford et al, 2003) 67
شکل 4-48: مدل میکروی ارائه شده توسط Ford و مفصل پلاستیک ایجاد شده (Ford et al, 2003)..... 68
شکل 4-49: مدل سه بعدی پل (Frunzio, 2001)..... 68
شکل 4-50: مدل سه بعدی از سازه متقارن پل (Fanning, 2001)..... 68
شکل 4-51: معیار ویلیام وارنکه 69
شکل 4-52: تغییر مکان قائم پل..... 70
شکل 4-53: مدلسازی میله های تقویتی پل مصالح بنایی و محل قرار گیری آنها در نرم افزار Elfen 70
شکل 4-54: مدل پل مصالح بنایی در نرم افزار Ansys..... 71
شکل 4-55: جزئیات مش بندی مدل پل مصالح بنایی در نرم افزار Ansys..... 72
شکل 4-56: المان plan82 و روابط آن 72
شکل 4-57: المان contact 12..... 73
شکل 4-58: شرایط مرزی پایه ها..... 74
شکل 4-59: المان solid در sap2000 (Edward L. Wilson,2002) 74
شکل 4-60: تنشها در المان solid sap2000 (SAP2000-b,1998) 75
شکل 4-61: مش بندی در مدل مورد مطالعه..... 77