

بسم الله الرحمن الرحيم

# بررسی عملکرد، آسیب پذیری و مقاوم سازی پل ها

تألیف

دکتر علیرضا رهایی

دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندس افشین فیروزی

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سال ۱۳۸۴

رهایی، علیرضا، ۱۳۳۲ -

بررسی عملکرد، آسیب‌پذیری و مقاوم‌سازی پل‌ها / تألیف علیرضا  
رهایی، افشین فیروزی. - تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک  
تهران)، مرکز نشر، ۱۳۸۴.  
[۱۰]، ۲۵۹ ص.: مصور، جدول.

ISBN: 964-463-268-0

فهرست‌نویسی بر اساس اطلاعات فیپا.  
واژه‌نامه.

کتابنامه. ص. ۳۴۵ - ۳۵۰.  
نمایه.

۱. پل و پل‌سازی. ۲. پل‌ها - طرح و ساختمان. ۳. پل‌ها - نگهداری و تعمیر. ۴.  
سازد - پایداري. الف. فیروزی، افشین، ۱۳۵۵ - ب. دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران). مرکز نشر. ج. عنوان.

۶۲۴/۲

۴پ ۹/ر ۱۴۵ TG

۸۴ - ۸۶۸۷ م

کتابخانه ملی ایران

این کتاب در جلسه مورخ ۸۳/۱۲/۱۷ شورای چاپ و  
نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسید.



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

عنوان کتاب : بررسی عملکرد، آسیب‌پذیری و مقاوم‌سازی پل‌ها  
تألیف : دکتر علیرضا رهایی - مهندس افشین فیروزی  
ناشر : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)  
لیتوگرافی، چاپ و صحافی : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)  
چاپ اول : سال ۱۳۸۴  
تیراژ : ۱۰۰۰ نسخه  
قیمت : ۳۰۰۰ تومان  
شابک : ۹۶۴-۴۶۳-۲۶۸-۰  
تلفن مرکز پخش: ۶۳۹۸۸۶۸  
ISBN: 964-463-268-0

آدرس: خیابان ولی‌عصر، روبروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

ایجاد و توسعه راه‌های ارتباطی که عموماً در مسیر خود شامل تعداد متنابهی پل‌های بزرگ و کوچک هستند از شاخص‌های مهم پیشرفت هر کشور است و از طرف دیگر پل‌ها یکی از مهم‌ترین شریان‌های حیاتی هستند که بعد از وقوع زلزله باید امکان حمل و نقل وسائل نقلیه از جمله خودروهای کمکرسانی را فراهم نمایند.

متأسفانه در کشور ما که از نواحی مهم زلزله‌خیز دنیاست تاکنون آیین‌نامه مدونی برای تحلیل و طراحی پل‌ها در برابر زلزله تهیه نشده است و تنها در چند سال گذشته یک دستورالعمل پیشنهادی از طرف مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن جهت تعیین بارگذاری زلزله روی پل‌ها ارائه گردیده است. لذا در طراحی بسیاری از پل‌های موجود در کشور اثر زلزله بصورت کامل منظور نشده و یا در تطبیق با آیین‌نامه‌های جدید این سازه‌ها از مقاومت کافی در برابر زلزله برخوردار نمی‌باشند.

با توجه به عدم آشنایی مهندسان کشور با روش‌های ارزیابی عملکرد و شیوه‌های مقاوم‌سازی پل‌ها از یک طرف و آسیب‌پذیر بودن این سازه‌های مهم در مقابل بلایای طبیعی و از جمله زلزله مولفین تصمیم گرفتند اقدام به تدوین کتاب بررسی عملکرد و روش‌های مقاوم‌سازی پل‌ها نمایند. در تدوین مطالب این کتاب سعی شده است با گردآوری عملکرد پل‌ها در کشورهای مختلف در مقابل زلزله و شرایط تهاجم دیگر، تجربیات مفید موجود در این زمینه به خوانندگان منتقل گردد. همچنین بعد از توضیح کامل سطوح عملکرد و روش‌های تحلیلی، یک مجموعه مطالب مفید در زمینه مدیریت بازرسی، تعمیر و نگهداری پل‌ها (BMS) ارائه شده که در صورت بکارگیری آن به عنوان یک شیوه علمی معتبر، ساماندهی مناسبی در وضعیت پل‌های درون شهری و برون‌شهری ایجاد خواهد شد. سپس انواع کامل روش‌های مقاوم‌سازی پل‌ها با ذکر جزئیات مربوطه مطرح گردیده است. امید است این کتاب مورد استفاده مهندسین، دانشجویان و همکاران محترم واقع شده و در جهت ایمن‌سازی شریان‌های حیاتی کشور بکار گرفته شود.

علیرضا رهایی      افشین فیروزی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بهار ۱۳۸۴

## گفتار اول: روشهای طبقه‌بندی و انتخاب سیستم پل‌ها

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| ۱-۱- مقدمه .....                  | ۱  |
| ۲-۱- گزینه‌های انتخابی .....      | ۳  |
| ۱-۲-۱- پل‌های بتن مسلح .....      | ۴  |
| ۲-۲-۱- پل‌های بتن پیش‌تنیده ..... | ۴  |
| ۳-۲-۱- پل‌های فلزی .....          | ۵  |
| ۳-۱- بارگذاری .....               | ۸  |
| ۴-۱- مطالعات هیدرولیکی .....      | ۱۱ |

## گفتار دوم: آسیب‌پذیری لرزه‌ای پل‌ها

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| ۱-۲- مقدمه .....                                                     | ۱۳ |
| ۲-۲- آسیب‌پذیری پل‌های بتنی .....                                    | ۱۳ |
| ۱-۲-۲- فروریزش دهانه‌های پل از تکیه‌گاه‌ها .....                     | ۱۵ |
| ۲-۲-۲- ضعفهای لرزه‌ای ستون‌ها .....                                  | ۱۷ |
| ۳-۲-۲- ضعفهای لرزه‌ای تیرها و گره‌های اتصال تیر به ستون .....        | ۲۰ |
| ۴-۲-۲- ضعفهای لرزه‌ای دیوار پایه‌ها (pier walls) .....               | ۲۱ |
| ۵-۲-۲- درزها و تکیه‌گاه‌ها در پل‌های بتنی .....                      | ۲۲ |
| ۶-۲-۲- برخی از موارد آسیب‌پذیری پل‌های بتنی در زلزله‌های گذشته ..... | ۲۵ |

|    |                                                          |
|----|----------------------------------------------------------|
| ۳۸ | ۳-۲- آسیب پذیری پل های فولادی                            |
| ۳۸ | ۱-۳-۲- مقدمه                                             |
| ۴۶ | ۲-۳-۲- عملکرد پل های فولادی در زلزله های اخیر            |
| ۵۰ | ۳-۳-۲- درزها و تکیه گاه ها در پل های فولادی              |
| ۵۱ | ۱-۳-۳-۲- دسته بندی آسیب پذیری متداول درزها و تکیه گاه ها |
| ۵۳ | ۴-۳-۲- دسته بندی اجمالی صدمات                            |
| ۵۳ | ۴-۲- شالوده ها                                           |
| ۵۵ | ۵-۲- کوله ها                                             |
| ۵۵ | ۶-۲- آسیب پذیری ناشی از گسترش جانبی در اثر روانگرایی خاک |
| ۵۷ | ۱-۶-۲- توصیه های آئین نامه ای در طراحی                   |

## گفتار سوم: آسیب پذیری در اثر شرایط محیطی و بارهای بهره برداری

|    |                                                             |
|----|-------------------------------------------------------------|
| ۵۹ | ۱-۳- مقدمه                                                  |
| ۶۱ | ۲-۳- آسیب های معمول در پل های فلزی                          |
| ۶۳ | ۱-۲-۳- خوردگی                                               |
| ۶۴ | ۱-۱-۲-۳- انواع خوردگی                                       |
| ۶۶ | ۲-۱-۲-۳- شدت خوردگی                                         |
| ۶۹ | ۲-۲-۳- خستگی                                                |
| ۷۰ | ۱-۲-۲-۳- پروسه شکست خستگی                                   |
| ۷۱ | ۲-۲-۲-۳- انواع شکست                                         |
| ۷۲ | ۳-۲-۲-۳- عواملی که رفتار شکست را تعیین می کنند              |
| ۷۳ | ۴-۲-۲-۳- طاقت شکست                                          |
| ۷۳ | ۵-۲-۲-۳- عواملی که شروع ترک خستگی را تحت تأثیر قرار می دهند |
| ۸۵ | ۶-۲-۲-۳- عواملی که باعث گسترش ترک خستگی می شوند             |
| ۸۷ | ۷-۲-۲-۳- پروسه شکست ترک بال                                 |
| ۹۱ | ۸-۲-۲-۳- پروسه شکست ترک جان                                 |
| ۹۴ | ۹-۲-۲-۳- طبقه بندی آشتو برای خستگی ناشی از بارگذاری         |

- ۱۰۳ ..... ۱-۲-۲-۳- رده‌های ترک خستگی
- ۱۰۹ ..... ۳-۳- آسیب‌پذیری روسازه‌های بتن مسلح
- ۱۱۱ ..... ۱-۳-۳- پل‌های صفحه‌ای درجا
- ۱۱۱ ..... ۲-۳-۳- پل با تیرهای حمال T شکل
- ۱۱۴ ..... ۳-۳-۳- پل‌های قوسی باز
- ۱۱۶ ..... ۴-۳-۳- قوس‌های بتنی بسته
- ۱۱۸ ..... ۵-۳-۳- پل قابی شکل
- ۱۱۸ ..... ۴-۳- آسیب‌پذیری روسازه‌های بتن پیش‌تنیده در شرایط بهره‌برداری
- ۱۱۸ ..... ۱-۴-۳- علل و طبیعت نارسایی‌های بتن پیش‌تنیده
- ۱۲۱ ..... ۱-۱-۴-۳- متداول‌ترین کاستی‌ها و ریشه‌های آنها
- ۱۲۳ ..... ۲-۱-۴-۳- عوامل خطر
- ۱۲۴ ..... ۳-۱-۴-۳- ترک خوردگی
- ۱۲۸ ..... ۲-۴-۳- نارسایی‌های پل‌های با تیر باربر
- ۱۲۹ ..... ۳-۴-۳- ترک‌های موجود در دال‌ها
- ۱۳۰ ..... ۴-۴-۳- ترک‌های قائم یا مایل سخت‌کننده‌ها
- ۱۳۲ ..... ۵-۴-۳- نابسامانی‌های پل‌های دالی
- ۱۳۲ ..... ۵-۳- نارسایی‌های سطوح روکش
- ۱۳۲ ..... ۱-۵-۳- ترک خوردگی
- ۱۳۲ ..... ۲-۵-۳- تغییر شکل
- ۱۳۳ ..... ۳-۵-۳- جداشدگی و فروپاشی
- ۱۳۳ ..... ۶-۳- نارسایی درزهای انبساط
- ۱۳۴ ..... ۱-۶-۳- مسائل ناشی از مشخصات هندسی پل
- ۱۳۵ ..... ۲-۶-۳- دسته‌بندی انواع درزها و خرابی‌های احتمالی آنها
- ۱۳۶ ..... ۳-۶-۳- انواع درزهای باز و نارسایی‌های متداول آنها
- ۱۴۱ ..... ۴-۶-۳- انواع درزهای بسته و نارسایی‌های متداول آنها
- ۱۴۴ ..... ۷-۳- نارسایی‌های سیستم زهکشی عرشه
- ۱۴۴ ..... ۸-۳- خرابی‌های ریل‌ها، پیاده‌روها و جدول‌ها
- ۱۴۵ ..... ۹-۳- آسیب‌پذیری دستگاه‌های تکیه‌گاهی

|     |                                               |
|-----|-----------------------------------------------|
| ۱۴۵ | ۱-۹-۳- مقدمه                                  |
| ۱۴۶ | ۲-۹-۳- نیروهای وارد بر تکیه گاه‌ها            |
| ۱۴۶ | ۳-۹-۳- تغییر مکان‌های افقی پل                 |
| ۱۴۷ | ۴-۹-۳- انواع تکیه گاه‌ها                      |
| ۱۵۷ | ۵-۹-۳- آسیب دیدگی تکیه گاه‌ها                 |
| ۱۵۹ | ۶-۹-۳- بازرسی تکیه گاه‌ها                     |
| ۱۶۹ | ۱-۱۰-۳- آسیب پذیری مربوط به پایه‌ها و کوله‌ها |

## گفتار چهارم: سطوح عملکرد و روشهای تحلیل غیرخطی

|     |                                                           |
|-----|-----------------------------------------------------------|
| ۱۷۵ | ۱-۴- مقدمه                                                |
| ۱۷۶ | ۲-۴- روش‌های عمومی ارزیابی                                |
| ۱۷۸ | ۳-۴- مدلسازی غیرخطی                                       |
| ۱۷۸ | ۱-۳-۴- مدلسازی غیرخطی با استفاده از رابطه تنش- کرنش       |
| ۱۷۸ | ۲-۳-۴- مدلسازی غیرخطی با استفاده از رابطه نیرو- تغییر شکل |
| ۱۸۰ | ۴-۴- ارزیابی غیرخطی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها                |
| ۱۸۱ | ۱-۴-۴- تحلیل دینامیکی غیرخطی                              |
| ۱۸۲ | ۲-۴-۴- تحلیل استاتیکی غیرخطی                              |
| ۱۸۲ | ۵-۴- ارزیابی براساس عملکرد با استفاده از تحلیل بارافزون   |
| ۱۸۲ | ۱-۵-۴- تعاریف                                             |
| ۱۸۵ | ۱-۱-۵-۴- تعاریف سطوح عملکردی مختلف                        |
| ۱۸۸ | ۲-۱-۵-۴- سطح خطر زلزله                                    |
| ۱۸۸ | ۳-۱-۵-۴- منحنی ظرفیت                                      |
| ۱۹۰ | ۴-۱-۵-۴- الگوی اعمال بار زلزله                            |
| ۱۹۰ | ۵-۱-۵-۴- تعریف طیف طرح الاستیک                            |
| ۱۹۴ | ۶-۱-۵-۴- ارزیابی عملکرد لرزه‌ای پل‌ها براساس تحقیقات UCSD |
| ۲۰۴ | ۲-۵-۴- تعیین نقطه عملکرد به روش طیف ظرفیت (CSM)           |
| ۲۰۵ | ۱-۲-۵-۴- تبدیل منحنی ظرفیت به فرمت ADRS                   |
| ۲۰۷ | ۲-۲-۵-۴- تهیه طیف نیاز در فرمت ADRS از طیف طرح الاستیک    |

|     |                                                                              |
|-----|------------------------------------------------------------------------------|
| ۲۱۴ | ۳-۲-۵-۴- مراحل گام به گام تعیین نقطه عملکرد                                  |
| ۲۱۵ | ۳-۵-۴- تعیین نقطه عملکرد به روش ضرایب تغییر مکان (DCM)                       |
| ۲۱۹ | ۴-۵-۴- کنترل عملکرد                                                          |
| ۲۲۰ | ۱-۴-۵-۴- معیارهای پذیرش در تراز عملکرد ایمنی جانی                            |
| ۲۲۳ | ۵-۵-۴- مزایای کاربرد تحلیل بارافزون در ارزیابی و طراحی براساس عملکرد سازه‌ها |
| ۲۲۴ | ۶-۵-۴- محدودیت‌های کاربرد تحلیل بار افزون                                    |

## گفتار پنجم: سیستم‌های مدیریت پل

|     |                                                |
|-----|------------------------------------------------|
| ۲۲۷ | ۱-۵- مقدمه                                     |
| ۲۲۸ | ۲-۵- اجزاء سیستم‌های مدیریت پل                 |
| ۲۲۸ | ۱-۲-۵- پایگاه داده موجودی                      |
| ۲۲۹ | ۲-۲-۵- پایگاه داده نگهداری                     |
| ۲۲۹ | ۳-۲-۵- مدل‌های هزینه                           |
| ۲۳۰ | ۴-۲-۵- پیش‌بینی وضعیت پل‌ها                    |
| ۲۳۰ | ۳-۵- تحلیل در سطح پروژه و شبکه                 |
| ۲۳۱ | ۴-۵- ورودی‌ها و خروجی‌ها و الگوریتم‌های BMS    |
| ۲۳۵ | ۵-۵- اصول بازرسی پل                            |
| ۲۳۶ | ۶-۵- انواع بازرسی پل                           |
| ۲۳۶ | ۱-۶-۵- بازرسی اولیه                            |
| ۲۳۷ | ۲-۶-۵- بازرسی منظم                             |
| ۲۳۸ | ۳-۶-۵- بازرسی آسیب                             |
| ۲۳۸ | ۴-۶-۵- بازرسی دقیق                             |
| ۲۳۹ | ۵-۶-۵- بازرسی ویژه                             |
| ۲۴۰ | ۷-۵- فواصل زمانی بازرسی‌ها                     |
| ۲۴۰ | ۸-۵- قابلیت‌ها، مسئولیت‌ها و وظایف گروه بازرسی |
| ۲۴۰ | ۱-۸-۵- مسئولیت‌های بازرس پل                    |
| ۲۴۱ | ۲-۸-۵- وظایف بازرس پل                          |



|     |                                                |
|-----|------------------------------------------------|
| ۲۴۲ | ۹-۵- ابزار و دستگاه‌های بازرسی.....            |
| ۲۴۳ | ۹-۵-۱- آزمایش‌های غیرمخرب.....                 |
| ۲۴۸ | ۵-۱۰- دفترچه ثبت برداشت‌های بازرسی در محل..... |
| ۲۵۷ | ۵-۱۱- تهیه گزارش بازرسی.....                   |
| ۲۵۷ | ۵-۱۱-۱- مقدمه گزارش.....                       |
| ۲۵۷ | ۵-۱۱-۲- تاریخچه و توصیف پل.....                |
| ۲۵۸ | ۵-۱۱-۳- روند بازرسی.....                       |
| ۲۵۹ | ۵-۱۱-۴- نتایج بازرسی.....                      |
| ۲۵۹ | ۵-۱۱-۵- نتیجه‌گیری‌ها.....                     |
| ۲۶۰ | ۵-۱۱-۶- توصیه‌ها.....                          |
| ۲۶۱ | ۵-۱۱-۷- ضمیمه‌ها.....                          |
| ۲۶۱ | ۵-۱۱-۷-۱- عکس‌ها.....                          |
| ۲۶۱ | ۵-۱۱-۷-۲- نقشه‌ها و شکل‌ها.....                |
| ۲۶۲ | ۵-۱۱-۷-۳- فرم‌های بازرسی.....                  |
| ۲۶۲ | ۵-۱۲- اهمیت گزارش بازرسی.....                  |
| ۲۶۲ | ۵-۱۲-۱- تعیین نواحی بحرانی.....                |
| ۲۶۲ | ۵-۱۲-۲- اولویت‌های نگهداری.....                |
| ۲۶۳ | ۵-۱۲-۳- تحلیل درجه‌بندی ظرفیت باربری.....      |
| ۲۶۳ | ۵-۱۲-۴- مدیریت پل.....                         |

### گفتار ششم: روش‌های مقاوم‌سازی پل‌ها

|     |                                                              |
|-----|--------------------------------------------------------------|
| ۲۶۵ | ۶-۱- مقدمه.....                                              |
| ۲۶۶ | ۶-۲- مصالح و روش‌های تعمیر و تقویت.....                      |
| ۲۶۶ | ۶-۲-۱- تعمیر و تقویت پل‌های بتنی.....                        |
| ۲۶۶ | ۶-۲-۱-۱- پل‌های بتنی درجا.....                               |
| ۲۶۷ | ۶-۲-۱-۲- بتن پر مقاومت با استفاده از مواد ضد جمع‌شوندگی..... |
| ۲۶۸ | ۶-۲-۱-۳- بتن پاشی (Guniting).....                            |
| ۲۷۰ | ۶-۲-۱-۴- بتن پلیمری.....                                     |

|     |                                                                    |
|-----|--------------------------------------------------------------------|
| ۲۷۱ | ..... ۵-۱-۲-۶ رزین‌ها                                              |
| ۲۷۳ | ..... ۶-۱-۲-۶ بتن‌های رزینی                                        |
| ۲۷۳ | ..... ۷-۱-۲-۶ گروت‌ها                                              |
| ۲۷۴ | ..... ۸-۱-۲-۶ چسباندن ورق‌های فولادی روی سطح بتن                   |
| ۲۷۵ | ..... ۹-۱-۲-۶ جوش دادن آرماتورهای جدید                             |
| ۲۷۶ | ..... ۱۰-۱-۲-۶ چسباندن ورق‌های الیاف پلیمری مرکب (FRP) روی سطح بتن |
| ۲۸۹ | ..... ۱۱-۱-۲-۶ پیش‌تنیدگی خارجی                                    |
| ۲۹۷ | ..... ۲-۲-۶ تعمیر و تقویت پل‌های فلزی                              |
| ۳۰۳ | ..... ۱-۲-۲-۶ ملاحظات کلی در تقویت پل‌های فولادی                   |
| ۳۰۵ | ..... ۲-۲-۲-۶ طبقه‌بندی عمومی روش‌ها                               |
| ۳۰۸ | ..... ۳-۲-۲-۶ مقاوم‌سازی توسط پیش‌تنیدگی خارجی                     |
| ۳۱۲ | ..... ۳-۶ روش‌های مقاوم‌سازی ضعیف‌های لرزه‌ای پل‌ها                |
| ۳۱۳ | ..... ۱-۳-۶ تقویت‌های عرشه                                         |
| ۳۱۳ | ..... ۱-۱-۳-۶ مهارها یا رابط‌ها                                    |
| ۳۲۲ | ..... ۲-۱-۳-۶ تعریض عرض تکیه‌گاه‌ها (نشیمن‌گاه تیرها)              |
| ۳۲۳ | ..... ۳-۱-۳-۶ جداسازی پایه                                         |
| ۳۲۳ | ..... ۴-۱-۳-۶ تیرها - گره‌های اتصال تیر به ستون، مهار آرماتور طولی |
| ۳۲۴ | ..... ۲-۳-۶ تقویت‌های زیرسازه                                      |
| ۳۲۴ | ..... ۱-۲-۳-۶ ستون‌های بتنی                                        |
| ۳۳۷ | ..... ۳-۳-۶ روش‌های مقاوم‌سازی لرزه‌ای شالوده‌ها                   |
| ۳۳۷ | ..... ۱-۳-۳-۶ مقاومت خمشی                                          |
| ۳۴۰ | ..... ۲-۳-۳-۶ مقاومت برشی                                          |
| ۳۴۱ | ..... ۳-۳-۳-۶ مقاومت برشی اتصال                                    |
| ۳۴۱ | ..... ۴-۳-۳-۶ مهار آرماتورهای ستون                                 |
| ۳۴۲ | ..... ۵-۳-۳-۶ مقاومت واژگونی                                       |
| ۳۴۵ | ..... منابع و مأخذ                                                 |
| ۳۵۹ | ..... فهرست راهنما                                                 |
| ۳۶۱ | ..... واژه‌نامه                                                    |