

سامانه مدیریت و کنترل هوشمند خرابی پل

تألیف:

دکتر وحید شاه‌حسینی (عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

دکتر علی‌اکبر رمضانیاپور (عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر)



مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران

سرشناسه :	شاهحسینی، وحید، ۱۳۶۱ -
عنوان و نام پدیدآور :	سامانه مدیریت و کنترل هوشمند خرابی پل / تألیف وحید شاهحسینی، علی اکبر رمضانپور؛ [برای] شهرداری تهران، مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران.
مشخصات نشر :	تهران : شهرداری تهران، مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، معاونت علم و فناوری، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری :	۵۳۹ ص: مصور، جدول.
شابک :	۳۰۰۰۰ ریال: ۹۷۸-۶۰۰-۷۹۲۸-۴۵-۵
وضعیت فهرست نویسی :	فیا
یادداشت :	واژه نامه.
یادداشت :	کتابنامه.
موضوع :	پل ها — نگهداری و تعمیر — مدیریت
موضوع :	Bridges -- Maintenance and repair -- Management
موضوع :	پل ها — نگهداری و تعمیر — مدیریت — ارزشیابی
موضوع :	Bridges -- Maintenance and repair -- Management -- Evaluation
موضوع :	پل ها — بازرسی — ارزشیابی
موضوع :	Bridges -- Inspection -- Evaluation
موضوع :	سیستم های کنترل هوشمند
موضوع :	Intelligent control systems
موضوع :	پل ها — شکستگی — پیشگیری
موضوع :	Bridge failures -- Prevention
موضوع :	مضانپور، علی اکبر، ۱۳۳۰ -
شناسه افزوده :	شهرداری تهران، مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران
شناسه افزوده :	Tehran Municipality, Tehran Urban Planning and Research Center
شناسه افزوده :	شهرداری تهران، مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، معاونت علم و فناوری
شناسه افزوده :	Tehran Municipality, Tehran Urban Planning and Research Center, Department of Science and Technology
رده بندی کنگره :	۱۳۹۵ س ۲/۵۳
رده بندی دیویی :	۶۲۴/۲۰۲۸۸
شماره کتابشناسی ملی :	۴۲۵۰۸۷۸



مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران

سامانه مدیریت و کنترل هوشمند خرابی پل

تألیف: دکتر وحید شاهحسینی (عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر): دکتر علی اکبر رمضانپور (عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
ویراستار: محمد تقی پور
صفحه آرایی و طراحی جلد: معاونت علم و فناوری
نوبت چاپ: اول - ۱۳۹۵
چاپ: فاطر نگار
شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه
بها: ۳۰۰۰۰ ریال
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۷۹۲۸-۴۵-۵
ناشر: انتشارات مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، معاونت علم و فناوری

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

نشانی: خیابان شریعتی، خیابان پل رومی، خیابان شهید اکبری، نیش خیابان آقابزرگی، شماره ۳۲

تلفن: ۲۳۳۹۲۰۸۲

کد پستی: ۱۹۶۴۳۵۶۱۱

info@rpc.tehran.ir

http://rpc.tehran.ir

سخن نخست

مدیریت پل راهکانش برای بهینه‌سازی استفاده از منابع موجود برای بازرسی، نگهداری و تعمیر پل‌ها است. به عبارتی دیگر، مدیریت پل ابزاری است که به وسیله آن، مجموعه پل از لحظه تصمیم‌گیری تا انتهای عمر مفید آن مراقبت می‌شود. با تأسف بسیاری از برنامه‌ریزان و مجریان پل در سراسر جهان، درحالی‌که نیاز به بازرسی و نگهداری منظم پل‌ها در طول عمر مفیدشان را تصدیق می‌کنند، اساساً بسیاری از موارد سیاست نگهداری، واکنشی را در پیش می‌گیرند که تنها وقوع یک حادثه اجتناب‌پذیر را به تعویق می‌اندازد. با توجه به اینکه ترافیک شهری عامل بسیار مهم و حیاتی برای پل‌ها است، سیکل‌های متناوب بارگذاری زنده، شدت بالای بارهای مرده و تأثیر آن‌ها بر دینامیک و میزان بارگذاری در ساعات مختلف شبانه‌روز، ازجمله عواملی هستند که بحث ترافیک را به موضوعی تعیین‌کننده در پل‌های شهر تهران تبدیل نموده است. امروزه در کشورهای مختلف دنیا بخش عظیمی از بودجه صرف تعمیر و نگهداری پل‌های سوارمرو می‌شود. از آنجاکه پل‌های شهر تهران از سرمایه‌های ملی است، حفظ و نگهداری پل‌ها بایستی در اولویت قرار گیرد. تحقیقات انجام گرفته در دنیا نشانگر آن است که تعویض یک پل چندین برابر ساخت یک پل جدید هزینه‌بردار است، ازاین‌رو برای اطمینان از اینکه پل‌های شهر تهران به‌طور مرتب بازرسی، ارزیابی و بهره‌برداری می‌شوند؛ مدیریتی نیاز است تا با انجام عملیات نگهداری و تعمیرات مناسب، سطح عملکرد موردنظر در طول عمر پل برآورده شود. ازاین‌رو، مدیریت مطالعات و برنامه‌ریزی امور فنی و عمرانی، استانداردسازی و امور بحران مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، سعی دارد در

راستای انجام وظایف خود، با انجام پژوهش‌ها و مطالعات راهبردی و نیز انتقال تجارب جهانی و در نهایت اجرایی شدن کاربست مطالعات و پژوهش‌ها، شرایطی را فراهم آورد که منجر به ارتقای وضعیت و عملکرد کیفی کلان‌شهر تهران در ابعاد مختلف شود. در این کتاب به دنبال آن هستیم که با بررسی روش‌های مختلف مدیریت و پایش سازه پل‌ها، تعیین شاخص‌های مؤثر این نوع ارزیابی‌ها در شناسایی وضع موجود پل‌ها، طبقه‌بندی آسیب‌ها و علل خرابی‌های پل‌های بتنی و فلزی، شرایط مدیریت بهره‌برداری و نگهداری پل‌ها در کوتاه‌مدت و بلندمدت فراهم گردد.

بابک نگاهداری

رئیس مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران

فهرست مطالب

س	پیشگفتار
۲۳	فصل ۱: سامانه‌های مدیریت نگهداری پل
۲۵	۱-۱. مقدمه
۲۸	۲-۱. نگاهی به مسئله خرابی پل
۲۹	۳-۱. سامانه‌های مدیریت پل
۳۰	۱-۲-۱. تعریف سامانه مدیریت پل
۳۱	۲-۳-۱. پایگاه داده موجود
۳۲	۳-۳-۱. پایگاه داده نگهداری
۳۳	۴-۲-۱. پیش‌بینی وضعیت پرها
۳۳	۵-۳-۱. تحلیلی در سطح پروژه و شبکه
۳۴	۶-۳-۱. ورودی و خروجی‌ها و الگوریتم‌ها (BM)
۳۷	۴-۱. مروری بر سامانه‌های موجود مدیریت پل
۳۹	۵-۱. کاربرد سامانه‌های هوشمند در بررسی و ارزیابی پل‌ها
۴۸	خلاصه فصل اول
۴۹	فهرست منابع
۵۳	فصل ۲: پایش سلامت سازه‌ها
۵۵	۱-۲. مراحل اصلی فرایند پایش سلامت سازه‌ها
۵۷	۱-۱-۲. طراحی سامانه پایش سلامت سازه
۵۸	۱-۱-۲-۱. تعیین اهداف پایش سازه
۵۹	۲-۱-۱-۲. ارزیابی شرایط عملکردی و محیطی سازه
۵۹	۳-۱-۱-۲. مدل‌سازی
۶۰	۱-۳-۱-۱-۲. مدل‌سازی سازه و اجزا
۶۲	۲-۳-۱-۱-۲. مدل‌سازی آسیب و تعیین پارامترهای موردنیاز برای پایش
۶۵	۴-۱-۱-۲. تعیین و انتخاب روش و راهبرد پایش سلامت
۶۶	۱-۴-۱-۱-۲. روش‌های پایش سلامت مبتنی بر ویژگی‌های ارتعاشی
۶۸	۲-۴-۱-۱-۲. روش‌های پایش سلامت مبتنی بر انتشار موج
۶۹	۳-۴-۱-۱-۲. روش پایش سلامت مبتنی بر مقاومت الکترومکانیکی
۷۰	۴-۴-۱-۱-۲. روش پایش سلامت مبتنی بر تغییرات دما

۷۱	۲-۱-۴-۵. روش پایش سلامت مبتنی بر خاصیت‌های مکانیکی
۷۲	۲-۱-۱-۵. طراحی شبکه حسگرها
۷۵	۲-۱-۱-۶. طراحی برنامه بهره‌برداری و نگهداری از سامانه پایش
۷۶	۲-۱-۲. اکتساب داده‌های موردنیاز
۸۲	۲-۱-۳. پردازش، تحلیل و تفسیر داده‌ها
۸۲	۲-۱-۴. پردازش و تمیز کردن داده‌ها
۸۴	۲-۱-۴-۱. شناسایی بارها
۸۵	۲-۱-۴-۲. استخراج ویژگی‌ها
۸۵	۲-۱-۴-۳. تشخیص و شناسایی آسیب
۸	۲-۱-۴-۳. آشکارسازی آسیب
۸۹	۲-۱-۴-۳-۲. مکان‌یابی آسیب
۸۹	۲-۱-۴-۳-۳. تعیین میزان آسیب
۹۰	۲-۱-۴-۳-۴. پیش‌بینی آسیب
۹۱	۲-۲. تجهیزات سخت‌افزاری موردنیاز داده در پایش سلامت سازه‌ها
۹۴	۲-۲-۱. انواع حسگرهای مورد استفاده در پایش سلامت سازه‌ها
۱۰۰	خلاصه فصل دوم
۱۰۱	فهرست منابع
۱۰۵	فصل ۳: اصول بازرسی
۱۰۷	۳-۱. مقدمه
۱۰۷	۳-۲. اصول بازرسی
۱۰۸	۳-۳. انواع بازرسی
۱۰۹	۳-۳-۱. بازرسی اولیه
۱۰۹	۳-۳-۲. بازرسی منظم
۱۱۰	۳-۳-۳. بازرسی آسیب
۱۱۰	۳-۳-۴. بازرسی دقیق
۱۱۱	۳-۳-۵. بازرسی ویژه
۱۱۱	۳-۴. فاصله‌های زمانی بازرسی‌ها
۱۱۲	۳-۵. محدوده بازرسی
۱۱۳	۳-۶. روش بازرسی اعضای پل‌ها
۱۱۳	۳-۶-۱. کولمها
۱۱۴	۳-۶-۲. پایه‌ها
۱۱۵	۳-۷. تیم بازرسی و وظایف آن‌ها
۱۱۶	۳-۸. آمادگی لازم برای بازرسی
۱۱۶	۳-۹. تجهیزات و ابزار بازرسی

۱۱۷	۱۰-۳. ایمنی
۱۱۷	۱۱-۳. گزارش بازرسی
۱۲۱	خلاصه فصل سوم
۱۲۲	فهرست منابع
۱۲۳	فصل ۴: نارسایی‌ها و علل خرابی پل‌ها
۱۲۵	۱-۴. مقدمه
۱۲۶	۲-۴. انواع پل‌ها
۱۲۷	۳-۴. سازوکار خرابی پل‌ها
۱۳۰	۴-۴. نارسایی‌ها و دلایل خرابی پل‌ها
۱۳۱	۵-۴. نارسایی‌ها و دلایل خرابی پل‌های بتن مسلح
۱۳۲	۱-۵-۴. ترک‌های پل‌های بتنی، انواع و علت‌های آن
۱۳۵	۱-۱-۵-۴. ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک
۱۳۸	۱-۱-۱-۵-۴. روش‌های جلوگیری از بروز ترک ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک
۱۳۸	۲-۱-۵-۴. ترک‌های ناشی از نشست پلاستیک
۱۳۹	۱-۲-۱-۵-۴. روش‌های مقابله با ترک‌های پلاستیک در صورت بروز
۱۴۰	۳-۱-۵-۴. ترک‌های ناشی از نشست تکه‌های
۱۴۰	۴-۱-۵-۴. ترک‌های ناشی از محدودیت در مقابل جابجایی حرارتی اولیه
۱۴۱	۱-۴-۱-۵-۴. عواملی که ترک‌های جابجایی حرارتی تحت تاثیر قرار می‌دهند
۱۴۲	۵-۱-۵-۴. ترک‌های ناشی از محدودیت در مقابل انقباض و جمع‌شدگی زود هنگام و خشک شدن درازمدت
۱۴۳	۱-۱-۵-۴. روش‌های پیشگیرانه برای کاهش ترک‌های انقباض ناشی از خشک شدن
۱۴۴	۲-۵-۴. خطاهای طراحی
۱۴۵	۳-۵-۴. خطاهای اجرایی
۱۴۵	۴-۵-۴. آسیب‌دیدگی بر اثر شرایط محیطی
۱۴۷	۱-۴-۵-۴. ترک‌های ناشی از خوردگی آرماتور
۱۴۹	۱-۱-۴-۵-۴. سازوکار خوردگی
۱۵۳	۲-۱-۴-۵-۴. آهنگ خوردگی
۱۵۵	۲-۴-۵-۴. ترک‌های ناشی از حمله سولفات‌ها
۱۵۸	۳-۴-۵-۴. ترک‌های ناشی از واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها
۱۶۲	۴-۴-۵-۴. ترک‌های ناشی از هوازدهی
۱۶۵	۵-۵-۴. نارسایی‌های سطحی
۱۶۵	۱-۵-۵-۴. قاره‌کن شدگی (Spalling)
۱۶۶	۲-۵-۵-۴. بیرون بریدگی‌ها (Popouts)
۱۶۷	۳-۵-۵-۴. کرم‌شدگی (Honeycomb)
۱۶۷	۴-۵-۵-۴. ابله زدن (Blistering)

۱۶۸	۵-۵-۵-۴ پوسته‌شدگی (Scaling)
۱۶۹	۶-۵-۵-۴ ورقه ورقه شدن (Delamination)
۱۷۰	۷-۵-۵-۴ شورزدگی (Efflorescence)
۱۷۰	۸-۵-۵-۴ لکه‌ها (Stains)
۱۷۰	۹-۵-۵-۴ سایش (Abrasion)
۱۷۱	۶-۵-۴ نارسایی‌های سازه‌ای
۱۷۲	۱-۶-۵-۴ محدودیت ترک در نواحی کششی
۱۷۲	۲-۶-۵-۴ محدودیت ترک در ناحیه فشاری
۱۷۴	۳-۶-۵-۴ خستگی (Fatigue)
۱۷۵	۴-۶-۵-۴ انحراف بیش از حد (Excessive Deflection)
۱۷۶	۵-۵-۴ تغییرات درجه حرارت (Temperature Changes Conversion)
۱۷۹	۷-۵-۴ بتن در آب املاح‌دار
۱۸۰	۶-۴ نارسایی‌ها و پیل خرابی‌های فولادی
۱۸۱	۱-۶-۴ خوردگی
۱۸۳	۱-۱-۶-۴ انواع خوردگی در بتن مسلح
۱۸۴	۲-۱-۶-۴ شدت خوردگی
۱۸۵	۲-۶-۴ ترک ناشی از خستگی
۱۸۵	۱-۲-۶-۴ فرایند شکست خستگی
۱۸۵	۱-۱-۲-۶-۴ ایجاد ترک
۱۸۵	۲-۱-۲-۶-۴ گسترش ترک
۱۸۵	۳-۱-۲-۶-۴ شکست
۱۸۵	۴-۱-۲-۶-۴ عمر خستگی
۱۸۶	۲-۲-۶-۴ انواع شکست
۱۸۶	۳-۲-۶-۴ عواملی که رفتار شکست را تعیین می‌کنند
۱۸۷	۴-۲-۶-۴ طاقت شکست
۱۸۷	۵-۲-۶-۴ عواملی که شروع ترک خستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهند
۱۸۸	۱-۵-۲-۶-۴ جوش‌ها
۱۹۲	۲-۵-۲-۶-۴ ترک‌ها در مصالح
۱۹۳	۳-۵-۲-۶-۴ ترک‌های هنگام ساخت
۱۹۴	۴-۵-۲-۶-۴ ترک‌های ناشی از حمل و نقل، نصب و اجرا
۱۹۵	۵-۵-۲-۶-۴ ترک‌های حالت بهره‌برداری
۱۹۵	۶-۲-۶-۴ عواملی که باعث گسترش ترک خستگی می‌شوند
۱۹۶	۱-۶-۲-۶-۴ بازه تنش
۱۹۶	۲-۶-۲-۶-۴ تعداد سیکل‌ها
۱۹۶	۳-۶-۲-۶-۴ نوع جزئیات

۱۹۷	۴-۲-۷. فرایند شکست ترک بال
۱۹۸	۴-۲-۸. فرایند شکست ترک جان
۲۰۰	۴-۲-۹. رده‌های ترک خستگی
۲۰۳	۴-۲-۱۰. ترک خوردگی جوش
۲۰۳	۴-۲-۱۱. ترک جوش
۲۰۳	۴-۲-۱۲. عواملی که باعث وقوع ترک در نوار جوش می‌شوند (به صورت ظاهری یا داخلی)
۲۰۴	۴-۲-۱۳. عواملی که باعث وقوع ترک در حوزه تأثیر حرارت (ناحیه تفتیده) در فلز پایه می‌شوند (ترک در زیر نوار جوش)
۲۰۴	۴-۲-۱۴. عواملی که باعث وقوع ترک در جوش در هنگام بهره‌برداری می‌شوند (ترک مقاومتی)
۲۰۴	۴-۲-۱۵. عواملی که باید کنترل شوند
۲۰۵	۴-۲-۱۶. خا
۲۰۵	۴-۲-۱۷. رزق ها، بازک
۲۰۶	۴-۲-۱۸. های ضخیم
۲۰۷	۴-۲-۱۹. جوش گوشه
۲۰۹	۴-۲-۲۰. جوش های نیاری
۲۱۱	۴-۲-۲۱. ترک های داخلی در نوار جوش نسبت عرض به عمق نوار ذوب
۲۱۳	۴-۲-۲۲. ترک در زیر نوار جوش (ترک های ع)
۲۱۵	خلاصه فصل چهارم
۲۱۶	فهرست منابع فارسی

۲۱۷	فصل ۵: تشخیص و ارزیابی خرابی
۲۱۹	۵-۱. روش های تشخیص خرابی پل ها
۲۲۰	۵-۲. آزمایش ها مخرب و غیر مخرب
۲۲۲	۵-۳. آزمایش های ارزیابی مشخصات مصالح در پل های بتنی
۲۲۳	۵-۳-۱. آزمایش های مخرب
۲۲۴	۵-۳-۲. آزمایش های غیر مخرب
۲۲۹	۵-۳-۳. برخی آزمایش های شیمیایی
۲۲۹	۵-۳-۴. تشخیص عمق کربناتاسیون
۲۲۹	۵-۳-۵. تشخیص حمله سولفاتی
۲۲۹	۵-۳-۶. تشخیص مقدار کلرید
۲۲۹	۵-۳-۷. برخی از آزمایش های تشخیص غیر مخرب (NDT)
۲۲۹	۵-۳-۸. چکش اشمیت و آزمایش های دیگر برای مقاومت بتن
۲۲۹	۵-۳-۹. روش های مغناطیسی برای تشخیص آرماتور
۲۳۰	۵-۳-۱۰. تکنیک رادار برای تشخیص ترک ها و خرابی ها در بتن
۲۳۰	۵-۳-۱۱. رادیوگرافی برای تشخیص نقص های فولاد، بتن و...
۲۳۰	۵-۳-۱۲. حرارت سنجی برای تشخیص لایه لایه شدگی و ترک

۲۳۰	۵-۳-۴-۶. روش موج ماورای صوت
۲۳۱	۵-۳-۴-۷. تشخیص الکتریکی خوردگی
۲۳۱	۵-۴-۴. آزمایش های ارزیابی مشخصات مصالح در پل های فولادی
۲۳۲	۵-۴-۱. آزمون های کیفی اتصالات جوشی
۲۳۲	۵-۴-۲. آزمون های مخرب
۲۳۲	۵-۴-۳. آزمون های غیر مخرب
۲۳۵	۵-۴-۴. حداقل تعداد آزمایش
۲۳۶	۵-۵. پردازش تصاویر در تشخیص خرابی
۲۳۷	۵-۵-۱. پیل پردازش
۲۳۷	۵-۵-۱-۱. متوسط مجاورت (فیلتر میانگین)
۲۳۸	۵-۵-۲. فیلتر مدیان
۲۳۹	۵-۵-۱-۱. متوسط تصاویر چندگانه
۲۴۰	۵-۵-۱-۴. هیستوگرام تصویر
۲۴۰	۵-۵-۲. انطباق تصویر
۲۴۲	۵-۵-۳. بازساخت الگو
۲۴۲	۵-۵-۳-۱. بخش بندی
۲۴۵	۵-۵-۳-۲. استخراج مشخصات
۲۴۶	۵-۵-۳-۳. طبقه بندی
۲۴۷	۵-۵-۳-۱. طبقه بندی با نظارت
۲۴۸	۵-۵-۳-۲. طبقه بندی بدون نظارت
۲۵۰	۵-۵-۴. تشخیص ترک
۲۵۰	۵-۵-۴-۱. روش تشخیص لبه
۲۵۵	۵-۵-۴-۲. روش ریخت شناسی
۲۵۵	۵-۵-۴-۱. انشاع
۲۵۶	۵-۵-۴-۲. سایش
۲۵۶	۵-۵-۴-۳. گرا دیان ریخت شناسی
۲۵۷	۵-۵-۴-۴. باز کردن
۲۵۷	۵-۵-۴-۵. بستن
۲۵۹	۵-۵-۴-۶. استخراج اسکلت بندی ترک
۲۶۱	خلاصه فصل پنجم
۲۶۲	فهرست منابع
۲۶۳	فصل ۶: درجه بندی پل و ارزیابی ریسک
۲۶۵	۶-۱. مدیریت پل و پایش سلامت
۲۶۸	۶-۲. پایش سلامت سازه

۲۶۹	۱-۲-۶. اصول پایش سلامت سازه
۲۷۰	۲-۲-۶. ارزیابی وضعیت
۲۷۲	۳-۲-۶. وضعیت کلی
۲۷۵	۴-۲-۶. وضعیت عناصر پل
۲۷۵	۱-۴-۲-۶. کابل‌ها و آویزها
۲۷۵	۲-۴-۲-۶. عناصر غیر سازه‌ای
۲۷۵	۵-۲-۶. مقررات، استانداردها و جنبه‌های قانونی
۲۷۶	۶-۲-۶. ابزارها
۲۷۶	۳-۶. درجه‌بندی پل و ارزیابی ریسک
۲۷۷	۴-۶. درجه‌بندی باررسی
۲۸۰	۱-۴-۶. موازنه محدویت‌های باررسی عناصر
۲۸۲	۵-۶. درجه‌بندی BRIMOS
۲۸۳	۱-۵-۶. کیفیت سازه
۲۹۲	۲-۵-۶. اصلاح مشخصه‌های سازه
۲۹۲	۳-۵-۶. مقادیر میرایی
۲۹۴	۴-۵-۶. محاسبه مقدار تکنیک کاهش ترداشی (TLD)
۲۹۹	۵-۵-۶. شدت ارتعاش
۳۰۰	۶-۵-۶. فرم ویژه مولار
۳۰۰	۷-۵-۶. افزونگی
۳۰۱	۸-۵-۶. نوع سازه
۳۰۱	۹-۵-۶. شرایط محیطی
۳۰۲	۱۰-۵-۶. محاسبه مقدار درجه‌بندی
۳۰۲	۶-۶. تقریب احتمالاتی در SHM
۳۰۴	۱-۶-۶. روش تقریب تحلیلی
۳۰۶	۲-۶-۶. نتایج
۳۰۷	۷-۶. ریسک‌های حاصل از خطرات طبیعی
۳۱۰	خلاصه فصل ششم
۳۱۱	فهرست منابع
۳۱۵	فصل ۷: سامانه‌های هوشمند پشتیبان تصمیم‌گیری
۳۱۷	۱-۷. هوش مصنوعی
۳۱۷	۲-۷. سامانه‌های خبره
۳۱۸	۳-۷. داده، اطلاعات و دانش
۳۱۹	۴-۷. روش‌های ابتکاری
۳۲۰	۵-۷. ویژگی‌ها و اجزای سامانه‌های خبره

۳۳۲	۶-۷ مزایای سامانه‌های خبره
۳۳۳	۷-۷. تاریخچه
۳۳۴	۸-۷. نمایش دانش
۳۳۶	۷-۸-۱. قوانین
۳۳۷	۷-۸-۱.۱. الگوریتم‌های قوانین
۳۳۸	۷-۸-۲. شبکه‌های معنایی
۳۳۹	۷-۸-۳. قاب‌ها
۳۳۹	۷-۸-۴. منطق
۳۴۰	۷-۸-۱-۱. منطق گزاره‌ای
۳۴۰	۷-۸-۴-۱. منطق محمولات
۳۴۱	۷-۸-۲.۱. رها در منطق محمولات
۳۴۱	۷-۸-۵. مایش ترکیبی
۳۴۲	۷-۹. استنتاج
۳۴۳	۷-۹-۱. ساختار استنتاج
۳۴۳	۷-۹-۲. درخت تصمیم
۳۴۵	۷-۹-۳. روش‌های استنتاج
۳۴۶	۷-۹-۴. سازوکار استنتاج
۳۴۹	۷-۱۰. عدم قطعیت
۳۴۱	۷-۱۱. سامانه‌های پشتیبانی از تصمیم
۳۴۲	۷-۱۱-۱. سامانه‌های پشتیبانی از تصمیم برای SHM
۳۴۲	۷-۱۱-۲. سازه
۳۴۳	۷-۱۱-۳. حالت‌های عملیاتی
۳۴۵	۷-۱۱-۴. سامانه‌های پایش و پایگاه‌داده
۳۴۵	۷-۱۱-۴-۱. جمع‌آوری داده
۳۴۶	۷-۱۱-۴-۲. پردازش داده
۳۴۷	۷-۱۱-۴-۳. سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی
۳۴۹	۷-۱۱-۴-۴. پایگاه‌داده دانش
۳۵۲	۷-۱۱-۴-۵. سامانه پشتیبان تصمیم
۳۵۲	۷-۱۱-۴-۵-۱. مجموعه قوانین
۳۵۳	۷-۱۱-۴-۵-۲. قاعده
۳۵۴	۷-۱۱-۴-۵-۳. کاربرد
۳۵۴	۷-۱۱-۴-۵-۴. اطلاعات زمینه
۳۵۵	۷-۱۱-۴-۵-۵. متول‌های آنالیز
۳۵۶	۷-۱۱-۴-۵-۶. سایر کاربردها
۳۵۷	۷-۱۱-۴-۶. سامانه هشدار

۳۵۸	۱۱-۴-۱. درجه‌بندی BRIMOS
۳۶۰	۱۱-۴-۲. درجه‌بندی سطح ریسک
۳۶۰	۱۱-۴-۳. طول عمر باقیمانده
۳۶۱	۱۱-۵. وضعیت فعلی سامانه
۳۶۲	۱۱-۶. کار با داده‌ها
۳۶۴	۱۱-۷. ذخیره داده
۳۶۶	خلاصه فصل هفتم
۳۶۷	فهرست منابع
۳۶۹	فصل ۸: ارزیابی طول عمر پل‌ها
۳۷۱	۸-۱. مقدمه
۳۷۲	۸-۲. فرآیند ارزیابی طول عمر
۳۷۳	۸-۳. تشخیص نقاط حاد
۳۷۵	۸-۴. تشخیص الگوی آرمی
۳۷۶	۸-۴-۱. مقدمه
۳۷۷	۸-۴-۱-۱. پایش بی‌سیم سلامت، آزاره و باز به تشخیص غیرمتمرکز آسیب
۳۸۰	۸-۴-۱-۲. روش الگوی تشخیص آسیب غیرمتمرکز روش تشخیص الگوی آماری
۳۸۱	۸-۴-۱-۳. ساختار معیار ASCE
۳۸۴	۸-۴-۱-۴. نمای کلی
۳۸۵	۸-۴-۲. بررسی طبقه‌بندی الگوی آماری بر اساس الگوهای تشخیص آسیب
۳۸۶	۸-۴-۳. مدل‌سازی سیگنال و روش‌های استخراج ویژگی
۳۸۷	۸-۴-۳-۱. مدل‌های حوزه زمان-مدل‌های خانواده AR
۳۹۴	۸-۴-۳-۲. تعریف و توسعه ویژگی حساس به آسیب با استفاده از ضرایب A_{10}
۴۰۰	۸-۴-۳-۳. مدل‌های حوزه زمان و فرکانس - آنالیز موجک سیگنال‌های لرزش
۴۰۶	۸-۴-۴. طرح‌های طبقه‌بندی
۴۰۷	۸-۴-۴-۱. آزمون فرضیه
۴۰۹	۸-۴-۴-۲. مدل‌های مخلوط گوسی
۴۱۲	۸-۴-۴-۳. سایر طرح‌های طبقه‌بندی
۴۱۴	۸-۴-۵. کمی‌سازی و محلی‌سازی آسیب
۴۱۵	۸-۴-۵-۱. ستشش وسعت آسیب با استفاده از فاصله ماه‌آلاتوبیس
۴۲۰	۸-۴-۵-۲. اثر نویز
۴۲۱	۸-۵. مثال کاربردی: پل‌های فولادی
۴۲۱	۸-۶. تحقیقات در دست اجرا و پروژه‌های بهسازی
۴۲۲	۸-۶-۱. برنامه عملکرد طولانی‌مدت پل‌ها در اداره کل بزرگراه‌های آمریکا (FHWA)
۴۲۵	۸-۶-۲. ابتکار عمل پایش و کنترل ارزیابی سازه‌ای در اروپا

۴۲۵	۸-۶-۳. برنامه‌های دیگر-اتحادیه اروپا، ژاپن، کره و چین
۴۲۵۷	خلاصه فصل هشتم
۴۲۸	فهرست منابع
۴۳۳	فصل ۹: سامانه هوشمند ستجش و ارزیابی وضعیت
۴۳۵	۹-۱. مقدمه
۴۳۵	۹-۲. معرفی زبان برنامه‌نویسی Visual C# و Microsoft Access
۴۳۶	۹-۳. اجزا و قابلیت‌های سامانه خبره پل‌ها
۴۳۷	۹-۴. طریقه فرآیند استنباط در سامانه خبره پل‌ها
۴۳۷	۹-۴-۱. بهسازی سامانه ورودی و گزارش
۴۳۸	۹-۴-۲. سامانه خبره
۴۳۸	۹-۴-۳. سامانه مدیریت ماه اطلاعات
۴۴۰	۹-۴-۴. سامانه مدیریت ارزیابی
۴۴۰	۹-۴-۵. واسط کاربر
۴۴۰	۹-۵. نمایش دانش
۴۴۱	۹-۶. روش استنتاج و سازوکار جستجو
۴۴۴	۹-۷. پایگاه دانش سامانه خبره پل‌ها
۴۴۶	۹-۷-۱. پایگاه دانش ترک‌خوردگی در بتن
۴۴۹	۹-۷-۲. پایگاه دانش نارسایی‌های سطحی
۴۵۳	۹-۷-۳. پایگاه دانش نارسایی‌های سازه‌ای
۴۵۵	۹-۸. ارائه معیارهای مجاز بهره‌برداری با توجه به آیین‌نامه‌ها، استانداردها، مستندات
۴۵۸	۹-۸-۱. روش ارزیابی عملکرد بر اساس UCSD
۴۶۱	۹-۹. شیوه درجه‌بندی عملکرد و ارزیابی وضعیت پل بتنی
۴۶۷	۹-۹-۱. طبقه‌بندی نارسایی‌ها و ارزش‌های خرابی
۴۶۷	۹-۹-۱-۱. ترک‌خوردگی
۴۷۰	۹-۹-۱-۲. نارسایی‌های سطحی
۴۷۱	۹-۹-۱-۳. نارسایی‌های سازه‌ای
۴۷۲	۹-۹-۲. محاسبه شاخص وضعیت
۴۷۴	۹-۱۰. دفترچه برداشت‌های بازرسی در محل
۴۷۴	۹-۱۰-۱. اطلاعات پل
۴۷۵	۹-۱۰-۲. مشخصات عضو
۴۷۵	۹-۱۰-۳. اطلاعات بهره‌برداری
۴۷۵	۹-۱۰-۴. تشخیص نقص و خرابی
۴۷۵	۹-۱۰-۵. شدت خرابی
۴۷۵	۹-۱۰-۶. مقدار خرابی

۴۸۰	۱۱-۹. بازرسی میدانی پل دیو
۴۸۴	۱-۱۱-۹. ارزیابی وضعیت موجود پل غربی دیو
۴۸۶	۲-۱۱-۹. ارزیابی وضعیت موجود پل میانی دیو
۴۸۶	۳-۱۱-۹. ارزیابی وضعیت موجود پل شرقی دیو
۴۸۷	۴-۱۱-۹. نتیجه کلی از وضعیت پل غربی دیو
۴۸۹	۵-۱۱-۹. نتیجه کلی از وضعیت پل میانی دیو
۴۹۱	۶-۱۱-۹. نتیجه کلی از وضعیت پل شرقی دیو
۴۹۳	۱۲-۹. بازرسی میدانی پل کن
۴۹۶	۱-۱۲-۹. ارزیابی وضعیت موجود پل میانی
۴۹۷	۲-۱۲-۹. ارزیابی وضعیت موجود پل های کناری
۴۹۸	۳-۱۲-۹. نتیجه کلی از وضعیت پل میانی کن
۵۰۰	۴-۱۲-۹. نتیجه کلی از وضعیت پل های کناری کن
۵۰۱	۱۳-۹. بازرسی میدانی پل شهید صنیع خانی
۵۰۴	۱-۱۳-۹. ارزیابی وضعیت موجود پل شهید صنیع خانی
۵۱۴	۲-۱۳-۹. نتیجه کلی از وضعیت پل
۵۱۸	خلاصه فصل نهم
۵۱۹	فهرست منابع
۵۲۰	واژه نامه فارسی به انگلیسی
۵۳۰	واژه نامه انگلیسی به فارسی

پیشگفتار

پل‌ها، سکن‌داران زیرین، حمل‌ونقل ما هستند که جامعه بسیار به آن‌ها وابسته است. با توجه به افزایش جمعیت، عمر مجموعه پل‌های کشور، عملیات نگهداری پل‌ها نیز پیچیده‌تر شده است. به دلیل تردد اعمال مدیریت نگهداری پل‌ها، دامنه نارسایی‌ها به تدریج گسترش یافته و منجر به نابودی، توقف، افزایش احتمال گسیختگی ناگهانی و فاجعه‌آمیز، نابودی مصالح و آسیب دیدگی پل‌ها در اثر عوامل مختلف در حوزه بهره‌برداری شده و باعث کاهش عمر مفید، عمر خستگی و دوام پل‌ها شده است. سامانه‌ای که برای بهینه‌سازی استفاده از منابع موجود به منظور بازرسی، نگهداری، بازرسی و تعمیر پل‌ها طراحی شده است، سامانه مدیریت پل نامیده می‌شود. سامانه پایش سلامت پل، بخشی از سامانه کلی مدیریت نگهداری سازه است. هدف کلی پایش سلامت سازه، تعیین حالت مصالح متشکل اجزا مختلف و مجموعه کلی این اجزا که سازه را تشکیل می‌دهند، در هر لحظه از زمان عمر سازه است.

برای حفظ و بهبود کیفیت و ارائه خدمت بالا به عموم مردم، دانستن و استمرار چرخه حیات پل‌ها برای اطمینان یافتن از خدمات طولانی‌مدت و پایداری آنان و همچنین نظر به نیاز در مدیریت نگهداری زیرساخت‌های حمل‌ونقل کشور، تدوین رویکردها و جنبه‌های علمی و فنی پایش سلامت سازه پل‌ها امری ضروری است؛ بنابراین، این کتاب بر فعالیت‌ها و روش‌شناسی‌های مدیریت نگهداری پل‌ها بر اساس پایش پویای سلامت سازه‌های تمرکز دارد. با وجود اینکه پل‌ها برای یک دوره عمر طولانی طراحی و ساخته می‌شوند، تجربه سال‌های

آخر نشان داده است که آسیب‌پذیری این سازه‌ها در شرایط محیطی نامناسب یا در اثر عبور بارهای پیش‌بینی‌نشده که با عملیات بازرسی نگهداری و تعمیر کافی نیز همراه نباشد، بسیار زیاد و قابل‌توجه بوده و از این‌رو برای کاهش صدمات ناشی از این مسئله و پیشگیری از هزینه‌های هنگفت جایگزینی یا بازسازی‌های عمده، نیاز به برنامه‌ریزی دقیق دارد. تعیین علت خرابی، مشکل‌ترین و مهمترین مرحله در فرآیند تعمیر است. در این رابطه لازم است ترتیبی پیش‌بینی شود که اطلاعات مربوط به خاصیت‌های مهندسی مصالح به‌کاررفته، چگونگی استقرار اعضا، سازه‌ای و اتصالات آن‌ها به یکدیگر برای استفاده در تحلیل، مشخص شود. بدین منظور می‌بایست اطلاعات لازم از طریق اسناد و مدارک فنی (در صورت موجود بودن) یا با انجام آزمایش‌های تجربی تعیین گردد.

از سوی دیگر، سازه‌های درجه‌بندی، نمره‌ای را بر اساس ورودی تعیین‌شده توسط بازرسان پل ایجاد می‌کنند که برای درجه‌بندی به کار می‌رود. وضعیت نامناسب پل‌ها، به خاطر کمبود ابزارهای ارزیابی است. درجه‌بندی‌های بازرسی بسیار فردی و ذهنی هستند و متماثل نبودن بازرسان برای محاسبه کردن نشان‌ها می‌دهد. به‌منظور رسیدن به درجه‌بندی بهتر و واقعی‌تر، باید با مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده کامل شود. کلید موفقیت، داده‌هایی باکیفیت بالا همراه با نمونه‌های اساسی شده واقعی و قوانین خرابی که از نظر کمی به‌وسیله نظارت حمایت می‌شوند، است. ارزیابی دور عمل، به‌طور موازی با پایش سلامت سازه، به‌طور قابل‌توجهی می‌تواند دقت این پیش‌بینی‌ها را بهبود بخشد. این روش‌ها بر تأییدات به‌دست‌آمده از لرزش، کرنش یا سایر اطلاعات ثبت‌شده در گره‌های حسگر برای استخراج ویژگی‌هایی که با شروع آسیب که طی عملیات پایش از زمان سازه تغییر می‌کنند، تکیه‌دارند. خروجی می‌تواند یک نمایه پایایی، یک سطح ایمنی، یک نمونه گرافیکی یا هرگونه ارزش خروجی که موردنظر کارفرمایان پل است، باشد.

شناسایی بموقع نیاز برای ترمیم، بهسازی، نوسازی، تخریب و بازسازی از اهداف اصلی سامانه مدیریت پل‌ها است؛ به‌این‌ترتیب تدوین سامانه‌ای برای رسیدن به گرفتن تصمیمات منطقی و کم‌هزینه در ارتباط با این امور، روح اصلی سامانه مدیریت پل‌ها است. برنامه کاربردی سامانه ارزیابی خرابی پل‌های شهر تهران، با تمرکز بر روی خرابی‌های پل‌ها (ترک‌خوردگی،

نارسایی‌های سطحی و نارسایی‌های سازه‌ای) و بررسی و ارزیابی خرابی‌های این جزء سازه‌ای در شهر تهران، پیشنهادهایی درباره علت‌های خرابی وضعیت سازه، بیان می‌نماید. با توجه به نیاز بازرسی و ارزیابی وضعیت پل‌های شهر تهران، سامانه‌ای برای برداشت از جزئیات پل‌ها در بازرسی‌های فنی که معیارهای ثابتی را برای شناسایی و ارزیابی خرابی‌های بتن استفاده نماید، ضروری به نظر می‌رسد. سامانه ارزیابی خرابی پل‌های شهر تهران، باهدف تأمین نیازهای بخش مدیریت نگهداری پل‌ها طراحی و ساخته شده است و در بازرسی فنی پل‌ها، با برداشت از اطلاعات اجزای سازه‌ای، امکان شناسایی نارسایی‌ها و تشخیص علت‌های ایجاد خرابی، بتن را فراهم می‌آورد و سپس با تحلیل اطلاعات اندازه‌گیری شده و معیارهای طبقه‌بندی شده، عملکرد اجزای سازه‌ای را درجه‌بندی کرده و وضعیت خرابی‌ها را در پل‌های بتنی ارزیابی می‌نماید. در کارگاه ارزیابی سامانه طراحی شده، به گونه‌ای طراحی گردیده تا در عین دارا بودن دقت و کارایی بتوان آن را در شهر تهران بومی‌سازی کرده و برای بازرسی فنی پل‌های شهر مورد استفاده قرار داد.

به علت پیچیدگی موضوع، محدودیت‌هایی بر این روش است که می‌توان آن‌ها را در ترکیب با قضاوت مهندسی کمتر کرد. در هر صورت، این راه طولانی بیش روی ما قرار دارد؛ قبل از اینکه سامانه‌های مدیریت پل رایانه‌ای بر تجربه یک مهندس پل عالی‌رتبه برتری بیابند، این تردید وجود دارد که نیروی انسانی بتواند به‌طور کامل در همه زمینه‌ها، عمرانی جایگزین شده و یک ترکیب تأثیرگذار پیشنهاد شود. سامانه پیشنهاد شده به‌عنوان یک ابزار و پشتیبان برای مهندس پل و همچنین به‌عنوان یک شاخص بر عوامل پل دیده می‌شود؛ این‌ها آن‌چه شرایط بحرانی در حال پیشروی هستند و نیاز به فراخواندن یک متخصص است.

وحید شاه‌حسینی

علی اکبر رمضانیاپور

شهریورماه ۱۳۹۴