Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures

Hua-Peng Chen, Yi-Qing Ni

Publisher: John Wiley & Sons Ltd.

پایش سلامت سازه‌های بزرگ در مهندسی عمران

دامنه و کاربرد

(گزیده‌ای از کتاب)

تألیف: هُوا-پِنگ چِن، یی- چینگ نی
ترجمه: مهندس پوریا فروتن‌راد، دکتر شهریار طاوسی تفرشی

نشر علم عمران
www.elme-omran.com
Info@elme-omran.com

عضو:

انجمن فرهنگی ناشران کتاب دانشگاهی

این اثر مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هرکس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر و مؤلف، نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

سرشناسه : چن، هوآ–پنگ، Chen, Hua-Peng
عنوان و نام پدیدآور : پایش سلامت سازه‌های بزرگ در مهندسی عمران: دامنه و کاربرد (گزیده‌ای از کتاب)/ تالیف هوا – پنگ چن؛ ترجمه پوریا فروتن‌راد، شهریار طاوسی‌تفرشی.
مشخصات نشر : تهران : علم عمران ، ۱۴۰۳.
مشخصات ظاهری : ک، ۱۱۳ص.: مصور (بخشی رنگی)، جدول(بخشی رنگی).
شابک : ۱۴۵۰۰۰۰ ریال978-600-5176-66-7
موضوع : پایش سلامت سازه، Structural health monitoring
موضوع : تحلیل سازه، Structural analysis (Engineering)
شناسه افزوده نی، یی–چینگ، Ni, Yi-Qing
شناسه افزوده فروتن‌راد، پوریا، ۱۳۶۳–، مترجم، طاوسی تفرشی، شهریار، ۱۳۴۴– مترجم
رده بندی کنگره : TA656/6
رده بندی دیویی : ۶۲۱/۱۷۱
شماره کتابشناسی ملی : ۹۶۵۴۰۳۷

پایش سلامت سازه‌های بزرگ در مهندسی عمران – دامنه و کاربرد (گزینه‌ای از کتاب)
ترجمه : پوریا فروتن‌راد، شهریار طاوسی تفرشی
چاپ اول بهار ۱۴۰۳
چاپ پرستش
تعداد و قطع صفحات ۱۲۵ صفحه وزیری
شمارگان ۵۰۰
بهای کتاب ۱۴۵۰۰۰۰ ریال
شابک ۷–۶۶–۵۱۷۶–۶۰۰–۹۷۸ ISBN 978-600-5176-66-7

نشر علم عمران: تهران، یوسف آباد، خیابان جهان‌آرا، بین خیابانهای ۱۶ و ۱۸، پلاک ۳۳، طبقه دوم، واحد ۱۱
تلفن: ۳۱–۸۸۳۵۳۹۳۰ دورنگار: ۸۸۳۵۳۹۳۲

حقوق چاپ و نشر برای نشر علم عمران محفوظ است.

سخن ناشر

مهندسی عمران در رابطه با ساخت سازه‌ها بسیار سریع و در حیطه وسیعی رشد یافته است. بسیاری از ما هر روزه نیاز به ساخت سازه‌های با کیفیت و امن داریم تا انواع مختلف احتیاجات خود را مرتفع نماییم. آنچه بیش از هر چیز دیگری پس از ساخت یک سازه مهندسی با اهمیت جلوه می‌کند، نگهداری و شرایط نگهداری از سازه ساخته شده است. بی شک نگهداری صحیح از یک سازه باعث افزایش طول عمر آن و آسایش استفاده کنندگان در طول زمان خواهد شد.

مفهوم پایش سلامت که بیشتر در مورد سازه‌های با اهمیت مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرآیند مهندسی روش پیش‌بینانه برای مدیریت نگهداری و بررسی دوام سازه‌ها است. سازه‌های با اهمیت اغلب نقش اساسی در زندگی داشته و با هزینه‌های مالی و زمانی بسیار بالایی ساخته می‌شوند و هرگونه اختلال در رفتار آنها و یا آسیب در قسمتهایی از آنها می‌تواند باعث بروز صدمات جبران ناپذیر گردد. لذا با استفاده از پایش سلامت سازه‌ای می‌توان وضعیت بهره‌برداری از یک سازه را رصد نمود. انجام فرایند پایش سلامت سازه، بسته به میزان اهمیت یک سازه می‌تواند به صورت آزمایش‌های دوره‌ای بوده و یا با نصب تجهیزات پایش سلامت به صورت دائم روی سازه به صورت مستمر انجام شود.

کتاب حاضر که ترجمه کتاب پایش سلامت سازه‌های بزرگ در مهندسی عمران (دامنه و کاربرد) نوشته پنگ چن یکی از افراد باتجربه و صاحبنظر در این زمینه است، یکی از منابع اساسی در زمینه پایش سلامت سازه‌های مهندسی عمران است. گزیده‌ای از این کتاب توسط آقایان مهندس پوریا فروتن‌راد و دکتر شهریار طاوسی تفرشی استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز ترجمه شده است تا در اختیار علاقمندان قرار گیرد. شیوه ترجمه و تهیه مطالب بسیار روان بوده و مسلما برای علاقمندان این صنعت مفید خواهد بود. ممکن است علیرغم ویرایشهای مکرر هنوز اشکالات اندکی در ترجمه یا تایپ متن کتاب وجود داشته باشد. لذا ناشر و مترجمان آماده دریافت نظرات، پیشنهادات و انتقادات از طریق پست الکترونیک info@elme-omran.com هستند.

سخن مترجمین

پایش سلامت سازه به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن از تجهیزات مختلفی مانند حسگرها، فناوری سنجش، سیستم‌های انتقال داده و نرم‌افزارهای مرتبط استفاده می‌شود تا بر وضعیت فیزیکی و عملکرد سازه‌ها به‌طور مداوم نظارت شود. این فرآیند اغلب به‌عنوان یک رویکرد پیشگیرانه در مهندسی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌طوری‌که امکان تشخیص زودهنگام نقاط ضعف، نشتی‌ها، تغییرات در سازه، و حتی خطرات بالقوه مثل زلزله و بادهای شدید فراهم می‌شود. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط این سیستم‌ها، مهندسان می‌توانند الگوریتم‌ها و مدل‌هایی را برای تجزیه و تحلیل دقیق داده‌ها پیاده‌سازی کنند. این تجزیه و تحلیل می‌تواند شامل استخراج و پردازش اطلاعات مربوط به وضعیت سازه، تشخیص آسیب‌ها و نقاط ضعف، و ارائه پیشنهادات برای اقدامات تعمیر و نگهداری بهینه باشد. به‌طور کلی، پایش سلامت سازه به‌عنوان یک ابزار بسیار مؤثر و حیاتی در بهبود ایمنی، عمر مفید و کارایی سازه‌ها شناخته می‌شود. این فرآیند از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا امکان مشاهده و مدیریت بهتر خطرات و مسائلی که ممکن است برای سازه‌ها ضرر و زیان ایجاد کنند، فراهم می‌کند و به مهندسان امکان می‌دهد تا به‌صورت بهینه‌تر واکنش نشان دهند و از پتانسیل خطرات جلوگیری کنند.

کتاب مذکور شامل ده فصل می باشد و در این ترجمه به چهار فصل ابتدایی آن تحت عنوان "دامنه و کاربرد" که به بیان مفاهیم پایش سلامت سازه، حسگرها، انتقال و مدیریت داده‌ها و روش‌های شناسایی خرابی سازه اختصاص دارد، پرداخته شده است.

به امید آنکه این ترجمه، مسیر روشنی را برای آشنایی عمیق و اعتلای دانش، نه تنها در دانشجویان، بلکه در محققین و مهندسان متخصص صنعت ساختمان کشور، ارائه دهد.

پوریا فروتن راد
شهریار طاوسی تفرشی
بهار ۱۴۰۳

مقدمه

سازه‌ها در مهندسی عمران مانند پل‌ها و ساختمان‌ها به‌طورمعمول بزرگ هستند و با عدم قطعیت ساخته می‌شوند. در مرحله ساخت رفتار سازه باید پایش شود تا کیفیت و ایمنی فرآیندهای ساخت‌وساز کنترل گردند. پس از ساخت، مصالح ساختمانی باگذشت زمان در معرض تخریب قرار می‌گیرند و منجر به کاهش ظرفیت سازه و قابلیت بهره‌برداری می‌شوند. پایش سازه در مرحله بهره‌برداری، اطلاعات مفیدی در مورد عملکرد سازه تحت خرابی تدریجی مصالح و بارهای وارده ارائه می‌دهد و همچنین پاسخ‌های سازه در زمان اعمال ناگهانی اضافه‌بار را برداشت می‌کند. داده‌های جمع‌آوری‌شده از پایش بهنگام سازه می‌توانند برای تخمین خسارت و ارزیابی سلامت سازه‌های عمرانی به کار گرفته شوند. اندازه‌گیری مداوم داده‌ها در سیستم پایش می‌توانند زمینه‌ای برای پیش‌بینی عملکرد آینده و تعیین راهبرد[1] نگهداری بهینه برای سازه‌های موجود فراهم کنند.

پایش سلامت سازه[2] فرآیندی است شامل شناسایی خرابی ناشی از بهره‌برداری[3] و ارزیابی سلامت یک سازه از طریق سیستم نظارت خودکار. برای پایش سلامت سازه از سیستم‌های سنجش، سخت‌افزار و نرم‌افزارهای لازم جهت پایش وضعیت بهره‌برداری و پاسخ‌های سازه استفاده می‌شود. پایش سلامت سازه یک راهبرد شامل چندین مؤلفه اصلی ازجمله حسگرها، جمع‌آوری اطلاعات، انتقال اطلاعات، پردازش اطلاعات، مدیریت اطلاعات، ارزیابی سلامت و تصمیم‌گیری است. فناوری سنجش و الگوریتم‌های تفسیر سیگنال دو عامل مهم در توسعه راهبردهای موفق پایش سلامت سازه برای سازه‌های بزرگ عمرانی هستند. روش‌های ارزیابی خسارت با استفاده از اندازه‌گیری ارتعاشات مانند پارامترهای مودال، نوید ارزیابی سلامت سازه‌های عمرانی را می‌دهند.

توسعه یک راهبرد پایش سلامت سازه، نیازمند یک رویکرد چند رشته‌ای است که شامل بسیاری از زمینه‌ها، مانند حسگرها و شبکه‌های حسگر، پردازش سیگنال، آزمایش مودال، مدل‌سازی عددی، تحلیل احتمالاتی، تشخیص خرابی و پیش‌بینی خرابی می‌باشد. هر یک از این موضوعات به‌خودی‌خود موضوعی خاص بوده و در توسعه راهبردهای مؤثر در پایش سلامت سازه نیز به همان اندازه اهمیت دارند. سیستم‌های سنجش برای دستیابی دقیق و انتقال داده‌ها بسیار مهم هستند و از اطلاعات به‌دست‌آمده جهت پردازش سیگنال و استخراج ویژگی‌های کلیدی حساس در آسیب محلی استفاده می‌شود. آزمایش و تحلیل مودال برای شناسایی پارامترهای مودال از طریق اندازه‌گیری ارتعاش تعیین‌شده‌اند و داده‌های مودال به‌دست‌آمده می‌توانند برای به‌روزرسانی مدل و ارزیابی خرابی استفاده شوند. روش‌های احتمالاتی برای مدل‌سازی عددی جهت تشریح عدم قطعیت لازم بوده و یک چارچوب اساسی برای تحلیل قابلیت اطمینان و پیش‌بینی خرابی فراهم می‌کنند. هدف این کتاب ادغام این مباحث با تمرکز ویژه بر توسعه راهبردهای پایش سلامت سازه‌های بزرگ در مهندسی عمران است.

---

[1] Strategy
[2] Structural Health Monitoring
[3] in-service damage identification

این کتاب باهدف تبیین اصول راهبردی پایش سلامت سازه انجام‌شده است، بنابراین تمام ابعاد سیستم سنجش، پردازش داده‌ها و تحلیل داده‌ها، ارزیابی خسارت و تصمیم‌گیری برای پایش سازه و ارزیابی سلامت سازه‌های بزرگ عمرانی را در برمی‌گیرد. این کتاب[٤] از چهار بخش اصلی تشکیل‌شده است. ابتدا حسگرها و فناوری سنجش و سیستم‌های انتقال داده برای پایش سازه‌ها معرفی می‌شوند. از برداشت اطلاعات سیستم پایش سازه تا روش‌های تحلیل مودال برای استخراج پارامترهای مودال ارائه‌شده است که برای به‌روزرسانی و اعتبارسنجی مدل عددی المان محدود[٥] مرتبط استفاده می‌شود. سپس روش‌های مختلفی برای شناسایی وجود، مکان و میزان خسارت در سازه‌های عمرانی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و مشتقات آن‌ها ارائه‌شده است. سرانجام، پس از بررسی مستمر داده‌ها، از روش‌های احتمالاتی برای مدل‌سازی خرابی و تحلیل قابلیت اطمینان استفاده می‌شود که مبنایی جهت تصمیم‌گیری است. روش‌های راهبردی پایش سلامت سازه در تعدادی از مثال‌ها به‌خوبی توضیح داده‌شده است و همچنین بسیاری از مطالعات موردی واقعی بررسی[٦] شده است.

این کتاب می‌تواند به‌عنوان کتاب درسی برای دوره تحصیلات تکمیلی در زمینه‌ی پایش سلامت سازه با تأکید برسازه‌های مهندسی عمران مورداستفاده قرار گیرد. همچنین، این کتاب می‌تواند به‌عنوان راهنما برای مهندسین اجرایی که می‌خواهند روش‌های پایش سلامت سازه را به‌صورت عملی به‌کارگیرند، استفاده شود. مطالب با این فرض نوشته‌شده که خواننده با اصول پایه مهندسی آشنا بوده و به ریاضیات کمی بیشتر از سطح کارشناسی تسلط دارد. بعلاوه، این کتاب مرجع ارزشمندی برای کسانی است که در زمینه‌ی پایش و ارزیابی سلامت سازه[٧] تحقیق می‌کنند.

در این کتاب، چندین مطالعه موردی واقعی درباره پایش سلامت سازه‌های مهندسی عمران، مانند پل تسینگ‌ما[٨]، پل تینگ کائو[٩] و برج کانتون[١٠]، با همکاری سخاوتمندانه پروفسور یی کینگ نی[١١]، از دانشگاه پلی تکنیک هنگ کنگ انجام‌شده است. این برنامه‌های کاربردی زمینه‌های مختلفی را در فناوری پایش سلامت سازه شامل حسگرها و شبکه‌های سنجش، سیستم‌های انتقال و پردازش داده‌ها، روش‌های شناسایی خرابی سازه[١٢] و سیستم‌های پایش را در برمی‌گیرند که در چندین فصل مانند فصل ۲، ۳، ۷ و ۱۰ به‌عنوان نمونه استفاده می‌شوند.[١٣] این کتاب بدون این مثال‌های عملی کامل نخواهد بود، بنابراین عمیق‌ترین قدردانی را از پروفسور یی-کینگ نی[١٤] و همکارانش، به‌ویژه پروفسور جی.ام.کو[١٥]، دکترکی.وای.وونگ[١٦] و دکتر ایکس.دبلیو.یی[١٧] می‌شود.

درنهایت، نویسنده به دلیل کمک‌های مستقیم و غیرمستقیم در تهیه این کتاب مدیون بسیاری از افراد است. نویسنده مایل است از همکاران سابق و فعلی، همراهان پژوهشی و دانشجویان

---

[٤] ترجمه حاضر، شامل تمام بخش‌های کتاب مذکور نمی باشد.

[5] Finite Element

[6] Real case studies

[7] Structural monitoring and health evaluation

[8] Tsing Ma

[9] Ting Kau

[10] Canton

[11] YiQing Ni

[12] Structural damage identification

[١٣] کتاب مذکور شامل ده فصل بوده که در این ترجمه، به مطالعه و بررسی چهار فصل ابتدایی آن تحت عنوان "دامنه و کاربرد" پرداخته شده است.

[14] YiQing Ni

[15] J.M. Ko

[16] K.Y. Wong

[17] X.W. Ye

دکتری به خاطر حمایت و کارهای مفیدشان، به‌ویژه دکتر تی.ال.هوانگ[۱۸]، دکترتی.اس.مائونگ[۱۹]، دکتر جی.نپال[۲۰] و آقای سی.ژانگ[۲۱] تشکر نماید. نویسنده عمیقاً از خانواده خود به خاطر حمایت‌ها، صبر و درک آن‌ها به‌خصوص چنگ هنگ ژیائو[۲۲]، هلن[۲۳]، آلیس[۲۴] و ژوژنگ[۲۵] تشکر می‌کند.

هُوا–پِنگ چِن[۲۶]، لندن، نوامبر ۲۰۱۷

[18] T.L. Huang
[19] T.S. Maung
[20] J. Nepal
[21] C. Zhang
[22] Chengheng Xiao
[23] Helen
[24] Alice
[25] Xuezhang
[26] HuaPeng Chen

زندگینامه

هُوا-پِنگ چِن استاد مهندسی عمران، رئیس سازه‌های نوآورانه و هوشمند در دانشگاه گرینویچ[۲۷] انگلستان است. وی دکترای خود را در رشته مهندسی سازه از دانشگاه گلاسکو[۲۸]، انگلیس دریافت کرد و بیش از ۲۰ سال در زمینه‌ی پایش سلامت سازه، مدل‌سازی عددی پیشرفته و ارزیابی عملکرد سازه فعالیت داشته است. او یک مهندس عمران دارای پروانه مهندسی و عضو مؤسسه مهندسین عمران[۲۹] انگلستان است.

[27] University of Greenwich
[28] University of Glasgow
[29] Institution of Civil Engineers

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه‌ای بر پایش سلامت سازه ۱

۱-۱- پیشرفت در فناوری پایش سلامت سازه ۲

۱-۱-۱- سلامت سازه در مهندسی عمران ۲

۱-۱-۲- اهداف پایش سلامت سازه ۳

۱-۱-۳- توسعه روش‌های پایش سلامت سازه ٤

۱-۲- سیستم و راهبرد پایش سلامت سازه ٥

۱-۲-۱- سیستم پایش سلامت سازه و اجزای آن ٦

۱-۲-۲- راهبرد و روش پایش سلامت سازه ۷

۱-۳- مزایای بالقوه پایش سلامت سازه در مهندسی عمران ۹

۱-۳-۱- ویژگی پایش سلامت سازه در مهندسی عمران ۹

۱-۳-۲- مزایای بالقوه پایش سلامت سازه ۱۱

۱-۴- چالش‌ها و کار بیشتر در راستای پایش سلامت سازه ۱۳

۱-۴-۱- چالش‌های پایش سلامت سازه در مهندسی عمران ۱۳

۱-۴-۲- کار بیشتر بر روی پایش سلامت سازه برای کاربردهای عملی ۱۵

۱-۵- نتیجه‌گیری ۱۷

منابع این فصل ۱۸

فصل دوم: حسگرها و فناوری سنجش برای پایش سازه ۲۱

۲-۱- مقدمه ۲۱

۲-۲- انواع حسگرها ۲۳

۲-۳- اندازه‌گیری حسگر در پایش سازه ۲٦

۲-۳-۱- پاسخ سازه‌ای ۲٦

۲-۳-۲- مقادیر محیطی ۳۰

۲-۳-۳- متغیرهای عملیاتی ۳۲

۲-۳-۴- کمیت‌های متداول برای پایش پل ۳۳

۲-۳-۵- نمونه‌ای از سیستم نظارت سلامت سازه - پل معلق ۳٦

۲-۴- حسگرهای فیبرنوری ۳۹

۲-۴-۱- طبقه‌بندی حسگرهای فیبرنوری ۳۹
۲-۴-۲- حسگرهای فیبرنوری متداول در پایش سلامت سازه ٤٠
۲-۴-۳- حسگرهای فیبرنوری برای پایش سازه ٤۳
۲-۵- حسگرهای بی‌سیم ٤٥
۲-۵-۱- اجزای حسگرهای بی‌سیم ٤٦
۲-۵-۲- استقرار میدانی در زیرساخت‌های عمرانی ٤۷
۲-۶- انتخاب و مکان‌یابی بهینه حسگر ٤۸
۲-۶-۱- عوامل انتخاب حسگر ٤۸
۲-۶-۲- مکان‌یابی بهینه حسگرها ٥٠
۲-۷- مطالعه موردی ٥۲
۲-۷-۱- حسگرها و سیستم‌های سنجش برای پایش سلامت سازه ٥۳
۲-۷-۲- نصب حسگرهای شبکه فیبر براگ ٥٦
۲-۸- نتیجه‌گیری ٥۸
منابع این فصل ٦٠

فصل سوم: جمع‌آوری، انتقال و مدیریت داده **٦۳**

۳-۱- مقدمه ٦۳
۳-۲- سیستم‌های جمع‌آوری داده ٦٥
۳-۲-۱- جمع‌آوری داده برای پایش سلامت سازه ٦٥
۳-۲-۲- جمع‌آوری داده در پایش پل ٦٦
۳-۳- سیستم‌های انتقال داده ٦٦
۳-۳-۱- سیستم‌های انتقال سیمی ٦۷
۳-۳-۲- سیستم‌های انتقال بی‌سیم ٦۹
۳-۳-۳- انتقال داده در پایش پل ۷٠
۳-۴- سیستم‌های پردازش داده ۷۱
۳-۴-۱- پیش پردازش داده‌ها در پایش سلامت سازه ۷۱
۳-۴-۲- تجزیه و تحلیل و فشرده‌سازی داده‌ها ۷۲
۳-۴-۳- پردازش داده‌ها در پایش پل ۷۳
۳-۵- سیستم‌های مدیریت داده ۷٤
۳-۵-۱- ذخیره‌سازی داده‌ها و مدیریت فایل ۷٤

۳-۵-۲- مدیریت داده‌ها در پایش پل ۷۶
۳-۶- مطالعه موردی ۷۸
۳-۷- نتیجه‌گیری ۸۲
منابع این فصل ۸۳

فصل چهارم: روش‌های شناسایی آسیب‌های سازه **۸۵**

۴-۱- مقدمه ۸۵
۴-۲- آسیب در سازه‌ها ۸۷
۴-۳- روش‌های آزمون غیرمخرب ۸۸
۴-۳-۱- انتشار امواج صوتی ۸۹
۴-۳-۲- اولتراسوند ۹۱
۴-۳-۳- امواج هدایت‌شده (لمب) ۹۲
۴-۳-۴- تصویربرداری حرارتی ۹۳
۴-۳-۵- روش‌های الکترومغناطیسی ۹۴
۴-۳-۶- روش‌های خازنی ۹۵
۴-۳-۷- ارتعاش‌سنج لیزری داپلر ۹۶
۴-۳-۸- سیستم موقعیت‌یاب جهانی ۹۸
۴-۳-۹- بازرسی چشمی ۹۹
۴-۴- مقایسه آزمون غیرمخرب با پایش سلامت سازه ۱۰۰
۴-۵- پردازش سیگنال برای تشخیص آسیب ۱۰۱
۴-۵-۱- تبدیل‌های مبتنی بر فوریه ۱۰۲
۴-۵-۲- تبدیل موجک ۱۰۲
۴-۵-۳- تبدیل هیلبرت-هوانگ ۱۰۴
۴-۵-۴- مقایسه تبدیل‌های مختلف ۱۰۵
۴-۶- روش‌های مبتنی بر داده در مقابل روش‌های مبتنی بر مدل ۱۰۶
۴-۷- توسعه روش‌های مبتنی بر ارتعاش ۱۰۸
۴-۸- نتیجه‌گیری ۱۱۰
منابع این فصل ۱۱۲