

۱۷۱۸۱۵۱

پایش سلامت سازه‌ها

فرهاد حسینی

دکترای معماری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

علی‌اکبر جتهدی

دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز



انتشارات آردن

سرشناسه	: حسینلو، فرهاد، ۱۳۶۵
عنوان و نام پدیدآور	: پایش سلامت سازه/ تالیف: فرهاد حسینلو، علیرضا مجتهدی
مشخصات نشر	: تهران، آرون، ۱۳۹۷
مشخصات ظاهری	: ۱۸۱ ص. مصور.
شابک	: ۲ - ۶۰۵ - ۲۳۱ - ۹۶۴ - ۹۷۸
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیپا
موضوع	: پایش سلامت سازه
موضوع	: Structural health monitoring
سرشناسه	: مجتهدی، علیرضا، ۱۳۵۷
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۹۷ پ ۲ ح ۵ / ۶۵۶ TA
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۴ / ۱۷۱
شماره کتابخانه ملی	: ۵۲۸۱۸۶



انتشارات آرون

پایش سلامت سازه

مؤلف: فرهاد حسینلو، علیرضا مجتهدی

ناشر: انتشارات آرون

چاپ اول: ۱۳۹۷

چاپ مدیران: ۱۱۰۰ نسخه

۲۴۰۰۰ تومان

نشانی: میدان انقلاب - خیابان ۱۲ فروردین - خیابان وحید نظری - نرسیده به خیابان منیری جاوید

تلفن: ۵۱ - ۶۶۹۶۲۸۵۰

پلاک ۱۰۵ - واحد ۳

وبسایت: www.Arvanashr.ir

ایمیل: Arvanashr@yahoo.com

فصل اول: آشنایی با تاریخچه پایش سلامت سازه‌ها

۱-۱- آسیب در سازه‌ها.....	۱۱
۱-۲- کارهای تحقیقاتی با موضوع تشخیص آسیب.....	۱۴
۱-۲-۱- تشخیص آسیب بر اساس سنجش تغییرات مشخصات دینامیکی.....	۱۴
۱-۲-۲- روش‌های تشخیص آسیب برای سیستم‌های مختلف سازه‌ای.....	۲۴
۳-۱- برخی از روش‌های شناسایی آسیب در سازه‌های عظیم.....	۲۷
۱-۳-۱- شناسایی آسیب در سازه‌های عظیم مبتنی بر روش شبکه‌های عصبی.....	۲۹
۲-۳-۱- شناسایی آسیب در سازه‌های عظیم با روش انرژی کرنشی مودال.....	۳۰
۴-۱- ساده‌سازی ساختار مدل سازه‌های عظیم.....	۳۶
۵-۱- بروزرسانی مدل اجزای محدب بر اساس مدل تجربی.....	۳۶

فصل دوم: مؤلفه‌های پایش سازه‌ها و کاربردهای آن

۱-۲- مفاهیم اولیه پایش سلامت سازه‌ای.....	۳۹
۲-۲- اهداف و اهمیت پایش سلامت.....	۴۰
۳-۲- حسگرها جزء مؤلفه‌های اصلی سیستم پایش.....	۴۲
۴-۲- تاثیر بالقوه تکنیک‌های پایش سلامت سازه‌ای.....	۴۶
۵-۲- تکنیک‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی پایش سلامت سازه‌ای.....	۴۹
۱-۵-۲- سنجش.....	۴۹
۲-۵-۲- شناسایی بار.....	۴۹
۳-۵-۲- شناسایی آسیب.....	۵۰
۴-۵-۲- پیش‌بینی آسیب.....	۵۱
۶-۲- اصول و کاربرد پایش سلامت سازه‌ها.....	۵۱
۷-۲- روش‌های انجام پایش سلامت سازه.....	۵۲
۱-۷-۲- روش‌های مبتنی بر تشخیص.....	۵۳
۲-۷-۲- روش‌های مبتنی بر پیش‌بینی.....	۵۵
۳-۷-۲- روش‌های مبتنی بر ارتعاشات.....	۵۹
۱-۳-۷-۲- روش‌های مبتنی بر تحلیل مودال.....	۶۰
۲-۳-۷-۲- روش‌های مبتنی بر تحلیل سیگنال.....	۶۰
۳-۳-۷-۲- روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک.....	۶۱

۶۲	۲-۷-۴- روش‌های مبتنی بر پیزوالکتریسته
۶۲	۲-۷-۴-۱- حسگرهای فعال پیزوالکتریک
۶۳	۲-۷-۵- روش‌های موضعی و غیرمخرب
۶۳	۲-۷-۵-۱- میدل‌های فراصوتی فعال پیزوالکتریک
۶۵	۲-۷-۵-۲- آزمایش‌های اولتراسونیک
۶۶	۲-۷-۵-۳- آزمایش جریان گردابه‌ای
۶۷	۲-۷-۵-۴- ارزیابی ذرات مغناطیسی
۶۷	۲-۷-۵-۵- روش‌های بازرسی بصری و اسکنرهای اپتوالکتریک
۶۷	۲-۷-۵-۶- سیستم‌های اسکن لیزری

فصل سوم: شناسایی سیستم سازه و کمیت‌های مورد اندازه‌گیری

۶۹	۳-۱- نظریه‌های اساسی سیستم‌های دینامیکی
۷۰	۳-۲- ارزیابی عملکردی
۷۱	۳-۳- اخذ، ترکیب، و تصفیه داده
۷۱	۳-۴- برداشت و پردازش سیگنال
۷۲	۳-۴-۱- روش‌های تحریک سازه
۷۳	۳-۴-۲- برداشت پاسخ‌های سازه
۷۴	۳-۴-۳- استخراج مشخصه سیستم
۷۵	۳-۵- تحلیل مودال تجربی
۷۶	۳-۵-۱- اندازه‌گیری تجربی تابع پاسخ فرکانسی و تشخیص دهنده ارتعاشی
۸۳	۳-۵-۲- آزمایش ضربه چکش و آزمایش محرک لرزاننده
۸۵	۳-۶- ویژگی پدیده‌های سیستم سازه‌ای
۸۶	۳-۷- انواع پایش مبتنی بر استراتژی زمان
۸۶	۳-۷-۱- پایش کوتاه مدت
۸۶	۳-۷-۲- پایش طولانی مدت
۸۷	۳-۷-۳- پایش دوره‌ای، مداوم یا محرک
۸۸	۳-۸- ابزاربندی انواع حسگرها
۸۸	۳-۸-۱- سیستم‌های شبکه حسگر
۸۸	۳-۸-۱-۱- سیستم سیمی
۸۸	۳-۸-۱-۲- سیستم بیسیم
۸۹	۳-۹- انواع شبکه‌های حسگر
۸۹	۳-۹-۱- اتصال مستقیم به پردازشگر مرکزی
۸۹	۳-۹-۲- پردازش غیرمتمرکز با اتصال Hopping
۹۰	۳-۹-۳- پردازش غیرمتمرکز با اتصال هیبریدی
۹۱	۳-۱۰- موقعیت بهینه نصب حسگرها

۹۳	۱۱-۳- استخراج پارامترهای مودال سازه با استفاده از GPS برای پایش
۹۴	۱۱-۳-۱- نظریه پایش و داده‌ها
۹۵	۱۱-۳-۲- GPS افتراقی (DGPS)
۹۵	۱۱-۳-۳- اجزای پایش سیستم با GPS
۹۶	۱۱-۳-۴- انتخاب نقاط مرجع و نقاط دور
۹۶	۱۱-۳-۵- پردازش داده

فصل چهارم: بروزرسانی مدل اجزای محدود و روش‌های تخمین آسیب‌پذیری

۱۰۷	۱-۴- مدل‌سازی اجزای محدود
۱۰۳	۲-۴- تحلیل اجزای محدود
۱۰۴	۳-۴- داده‌های دانه - مودال (MDD)
۱۰۵	۴-۴- داده‌های مورد استفاده در بروزرسانی مدل اجزای محدود
۱۰۵	۴-۴-۱- فرکانس طبیعی
۱۰۶	۴-۴-۲- شکل مودها
۱۰۷	۴-۴-۳- داده‌های دامنه - فرکانس
۱۰۷	۴-۵- بروزرسانی مدل و تشخیص آسیب با استفاده از داده‌های تحلیل عملکردی
۱۰۸	۴-۵-۱- تحلیل مودال OMA و GMAX
۱۰۹	۴-۵-۲- فرایند عمومی بروزرسانی مدل اجزای محدود
۱۱۰	۴-۶- معیارهای مورد استفاده در بروزرسانی مدل اجزای محدود
۱۱۱	۴-۶-۱- مروری بر مشخصه‌های دینامیکی سازه‌ها
۱۱۲	۴-۶-۲- روش کاهش استاتیکی گویان (GSR)
۱۱۴	۴-۶-۳- روش کاهش دینامیکی گویان (GDR)
۱۱۴	۴-۶-۴- روش سیستم کاهشی اصلاح شده (IRS)
۱۱۵	۴-۶-۵- روش سیستم معادل روند گسترش کاهشی (SEREP)
۱۱۵	۴-۶-۶- روش گسترش با استفاده از ماتریس‌های جرم و سختی
۱۱۶	۴-۶-۷- روش گسترش با استفاده از داده‌های مودال (EMD)
۱۱۷	۴-۶-۸- روش‌هایی برای مقایسه داده‌ها
۱۱۷	۴-۶-۸-۱- مقایسه فرکانسهای طبیعی
۱۱۷	۴-۶-۸-۲- مقایسه شکل مودها
۱۱۸	۴-۶-۸-۳- معیار اطمینان توابع پاسخ فرکانسی (FRFAC)
۱۱۹	۴-۶-۸-۴- معیار اطمینان مودال (MAC)
۱۱۹	۴-۶-۸-۵- مختصات معیار اطمینان مودال (COMAC)
۱۲۰	۴-۷- تکنیک‌های بهینه‌یابی جهت بروزرسانی مدل اجزای محدود
۱۲۲	۴-۷-۱- روش ضرایب لاگرانژ - روش مستقیم
۱۲۵	۴-۷-۲- روش تابع پناالتی (جریمه)

۱۲۵	۴-۷-۲-۱- تشکیل ماتریس حساسیت
۱۲۶	۴-۷-۲-۲- تابع هدف
۱۲۷	۴-۸-۱- روشهای تخمین آسیب پذیری و کلاس بندی آنها در سازه‌ها
۱۳۰	۴-۸-۱- شاخص آسیب بر اساس منحنی برش - تغییر مکان طبقه
۱۳۲	۴-۸-۲- شاخص آسیب بر اساس تغییر مکان حداکثر و اتلاف انرژی
۱۳۴	۴-۸-۳- معرفی شاخص عمر مفید باقی مانده

فصل پنجم: پایش سلامت سازه‌های پیچیده براساس یک روش بدیع ساده‌سازی و

بروزرسانی مدل

۱۴۵	۵-۱- مقدمه
۱۳۸	۵-۲- مرور کلی بر روش‌های موجود
۱۳۹	۵-۳- ایجاد مدل RSM
۱۴۰	۵-۳-۱- روش FIIT
۱۴۳	۵-۳-۲- روش جستجوی سیستم باردار CSS
۱۴۵	۵-۳-۳- روند همزمان ساده‌سازی، نتایج و بروزرسانی مدل
۱۴۸	۵-۴- فرمول‌بندی روش تشخیص آسیب
۱۵۰	۵-۵- شرایط نقصان داده‌های مودال و کلاس مدل بهبود یافته
۱۵۱	۵-۶- مدل سه بعدی مقیاس شده سکوی SI ۵۹ و تست مودال آن
۱۵۷	۵-۷- استخراج پارامترهای مشخصه و تولید مدل RSM
۱۵۹	۵-۸- تشخیص آسیب
۱۶۲	۵-۹- تخمین و تشخیص آسیب با شکل‌های مودی بوده به نمره
۱۶۶	منابع

پیشگفتار

پایش سلامت سازه‌ای، حوزه‌ای تخصصی است که به منظور افزایش عمر مفید سازه‌ها، اقدام به بررسی و ارزیابی آسیب آن‌ها می‌نماید. طی دو دهه اخیر، محققین توجه فزاینده‌ای به روش‌های تشخیص آسیب کلی برای انجام پایش سازه‌ای نموده‌اند. عموماً این روش‌ها برای شناخت تغییرات بحرانی در اعضای سازه‌ای برای پیش‌بینی خرابی‌های غیر منتظره به کار می‌روند. در این روش‌ها، با استفاده از تخمین پارامترهای ارتعاشی و تکنیک‌های ارزیابی آنالین، وقوع آسیب قابل تشخیص بوده و در مراحل بعدی می‌توان محل و شدت آن‌ها را نیز برآورد نمود. کاربرد این تکنیک‌ها عموماً محدود به سازه‌هایی است که دسترسی به محدوده آسیب به سادگی امکان‌پذیر می‌باشد. با سازه‌ای پیچیده عظیمی همچون سازه‌های دریائی از نوع جکت وجود دارند که امر پایش سلامت در آن‌ها به راحتی صورت نمی‌گیرد و مستلزم انجام مطالعات دقیق علمی است.

این سازه‌ها دارای قاب فلزی پیش‌ساخته‌ای هستند که از کف دریا تا بالاتر از سطح آب ادامه دارد و عرشه‌ای فلزی بر روی آن قرار دارد. اصل اولیه در عملیات نگهداری سازه فراساحلی، نظیر شرایط دیگر سازه‌ها، کسب اطمینان از سلامت و زنده ماندن سازه است. طی دهه هشتاد، مطالعه مسئله شناسایی آسیب در صنعت فراساحل به طور خاص، در سکوهای جکتی آغاز گردید. این سازه‌ها در میان آب‌های دریا، در تماس مستقیم با محیط زیست قرار دارند و هرگونه خرابی غیر منتظره می‌تواند اثرات فاجعه باری بر روی طبیعت برجای بگذارد. خاطر نشان می‌گردد که هم‌اکنون در آب‌های خلیج فارس سازه‌هایی با عمر چندین دهه در حال بهره‌برداری می‌باشند که تجربه پدید آمدن طولانی را پشت سر گذاشته‌اند. از طرفی دیگر می‌توان گفت که ایده ردگیری تغییرات پاسخ‌های ارتعاشی سازه، برای محققین در زمینه‌های گوناگون مهندسی و به خصوص در پروژه‌های دانشگاهی، انگیزش زیادی را برای انجام بررسی و تحقیق ایجاد کرده است. ولی سوال مهمی که در مجامع علمی و به خصوص در بحث ارتباط با صنعت از سوی کسانی که به داوری می‌نشینند مطرح می‌گردد، این است که این دیدگاه و روش‌ها تا چه حد برای سازه‌ای عظیم دریایی، عملی و کاربردی می‌باشند.

این سوال به خصوص به هنگام یادآوری این موضوع حساس‌تر می‌گردد که بعضاً دشواری‌های درگیری عملی با یک سازه واقعی در محل، در پس بیان فرمول‌بندی‌های پیچیده ریاضی فراموش و پوشیده می‌گردد. با علم به نکته مذکور، دیدگاهی که برای پس زمینه تمامی مطالب در این کتاب ترسیم گردید، شامل در نظر گرفتن افقی است که نهایتاً در آن بتوان با مناسب‌ترین عملکرد به روشی با کمترین خطا برای یک سازه عملیاتی دست یافت. در واقع چیدمان این کتاب بر اساس انجام بررسی‌های تجربی مدل فیزیکی سازه‌های پیچیده فراساحلی جکتی ثابت صورت گرفته است تا بر اساس آن یک روش مناسب پایش سلامت بلند مدت برای این دست از سازه‌ها تهیه و پیشنهاد گردد. بنابراین در جهت رفع چالش‌های مذکور، ساختار بخش‌های مختلف کتاب به این صورت در نظر گرفته شده است:

ابتدا در فصل اول، به ترتیب پیشینه کارهای مربوط به روش‌های پایش کلی سازه‌ای با در نظر گرفتن نوع و ماهیت روش‌ها مطرح و سپس کارهای انجام گرفته در زمینه سازه‌های مختلف بررسی شده‌اند. آنگاه به پایه‌های پژوهشی و پیشینه کارهای آزمایش مدل فیزیکی در زمینه پایش اشاره شده است.

در فصل دوم، مطالبی در مورد مفاهیم، اهداف و اهمیت پایش سلامت سازه‌ها عنوان شده است. در ادامه در خصوص مؤلفه‌های اصلی سیستم پایش (حسگرها)، اصول و کاربردهای سیستم پایش، مدل‌سازی و شبیه‌سازی پایش سلامت سخن به میان آمده است. انتهای فصل دوم به معرفی روش‌ها و تکنیک‌های مختلف موجود در پایش سلامت سازه‌ها بر حسب دیدگاه‌های متنوع اختصاص داده شده است.

در فصل سوم، به طور کلی در مورد شناسایی سیستم سازه و کمیت‌های مورد اندازه‌گیری که جزو اساسی‌ترین مقادیر در حوزه پایش سلامت به شمار می‌روند، صحبت شده است. در این فصل مطالبی در ارتباط با نحوه استخراج مشخصه و تشخیص پارامترهای دینامیکی سازه‌ها با انجام تست مودال آزمایشگاهی، انواع و ابزاربندی حسگرها و پدیده‌های مورد اندازه‌گیری، موقعیت بهینه حسگرها، استفاده از GPS در این حوزه ارائه گردیده است.

در فصل چهارم، انواع روش‌های بروزرسانی مدل اجزای محدود معرفی و مورد بحث قرار گرفته است. از آنجایی که بروزرسانی مدل باید و اساس روش‌های پایش سلامت است، در ادامه این فصل به معرفی روش‌های مختلف مقایسه داده‌های مدل سازه‌ها پرداخته شده است. انتهای فصل چهارم، به مبحث مهم روش‌های تخمین آسیب‌پذیری در سازه‌ها و همچنین به معرفی شاخص عمر باقیمانده سازه اختصاص داده شده است.

سرانجام در فصل پنجم، برای فائق آمدن بر سختی و چالش‌های عملی موجود در حوزه پایش سلامت سازه‌های پیچیده و استراتژیک فراساحلی، یک روش تشخیص آسیب انعطاف‌پذیر با یک تکنیک جدید ساده‌سازی و بروزرسانی مدل منطبق بر داده‌های مودال تجربی معرفی گردید. به گونه‌ای که توسعه و به کار گرفتن چنین روش‌های پایش سلامت سرتاسری سازه‌های پیچیده فراساحلی به طور گسترده‌ای مؤثر واقع شود تا در زمان بهره‌برداری و طول عمر مفید سازه به کار گرفته شود.

شایان ذکر است مباحث این کتاب یکی از عناوین اصلی در برنامه آموزشی دانشجویان تحصیلات تکمیلی رشته عمران در گرایش‌های مختلف می‌باشد. این کتاب، علاوه بر استفاده دانشجویان رشته عمران، برای دانشجویان علاقمند رشته مکانیک در این حوزه می‌تواند مفید باشد. مطالب این کتاب برای طراحی و بیان گردیده است که بتواند راهنمایی خوب و مؤثر برای همه دانشجویان و متخصصان عزیز کشورمان برای انجام تحقیقات کارآمد در این حوزه باشد. مضاف بر این، این کتاب می‌تواند به ارزش دو واحد درسی برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی رشته مهندسی عمران ارائه گردد. امید آن می‌رود که با ارائه این کتاب بتوانیم سهم کوچکی در راستای اعتلای علمی دانشجویان، مهندسان و محققان فعال در این حوزه داشته باشیم.