

تشخیص آسیب در پایه‌های اسکله‌ی شمع و عرشه با استفاده از روش تابع چگالی انرژی سیگنال

وحید کریمی (دکتری)

محمدرضا جناقلو* (استاد)

احمدرضا مصطفی قره‌باغی (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۰ (۱۱-۱۰-۲۰۲۰)
دورن ۲-۳۷، شماره ۱/۳، ص. ۱۱-۲۰، (پژوهشی)

در مطالعه‌ی حاضر فرایند تشخیص آسیب در پایه‌های یک اسکله‌ی دلفینی بر مبنای مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی با به‌کارگیری انرژی موجک که از حساسیت بالایی نسبت به تغییرات جزئی در یک سیگنال ارتعاشی برخوردار است، ارائه شده است. همچنین بدون استخراج یک رابطه‌ی تحلیلی مشخص با عنوان شاخص آسیب، به‌طور مستقیم با محاسبه‌ی چگالی انرژی تبدیل موجک پیوسته (اسکالوگرام)، موقعیت دقیق آسیب تعیین شده است. بررسی نتایج حاصل نشان داد که روش پیشنهادی در سناریوهای شبیه‌سازی آسیب چندتایی بدون هیچ‌گونه خطای اضافی موقعیت سه آسیب ایجاد شده را به خوبی و با دقت لازم پیش‌بینی می‌کند. درحالی‌که در روش‌های دیگر تخمین موقعیت آسیب‌ها توأم با خطاست. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی، قابلیت روش به‌کارگرفته شده در تشخیص آسیب‌های چندتایی را با محاسبه‌ی چگالی انرژی تبدیل موجک پیوسته نشان می‌دهد.

vhd.karami@gmail.com
mrchenaghlu@sut.ac.ir
mgharabaghi@sut.ac.ir

واژگان کلیدی: اسکله‌ی دلفینی، تبدیل موجک، تشخیص آسیب، اسکالوگرام.

۱. مقدمه

تحقیقات در زمینه‌ی پایش سلامت مرتبط با سازه‌های عمرانی به دلایلی همچون تعمیر و نگهداری و اطمینان از خدمت‌دهی مناسب این سازه‌ها بیش از سه دهه است که در جریان می‌باشد. خرابی‌ها در یک سیستم سازه‌ی ممکن است مانند گسیختگی یک جزء در اثر بارگذاری زلزله به‌طور ناگهانی رخ دهد یا از نوع رشد آسیب و به‌صورت پیش‌رونده باشد؛ مانند کاهش سختی و مقاومت در اثر رشد ترک. بنابراین به روش‌هایی برای شناسایی خرابی نیاز است. در این راستا روش‌های پایش سلامت سازه‌ها که به اختصار (SHM) ^۱ نامیده می‌شود، موضوع تحقیقات پرآمنه‌ی است که تاکنون انجام شده است. ^[۱] به‌طور کلی روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌ها به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از روش‌های تشخیص آسیب بر پایه‌ی اطلاعات استاتیکی و روش‌های تشخیص آسیب بر پایه‌ی اطلاعات دینامیکی. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اطلاعات دینامیکی در مقایسه با اطلاعات استاتیکی در فرایند تشخیص آسیب از کارایی بیشتری برخوردارند و تحقیقات زیادی در این زمینه به انجام رسیده است. ^[۲-۴]

در همین راستا خلاصه‌ی از روش‌های رایج تشخیص آسیب بر پایه‌ی اطلاعات ارتعاشی و همچنین فرایند به‌کاررفته در آنها به‌منظور تشخیص موقعیت آسیب‌ها در جدول ۱ به نمایش درآمده است. در جدول ۲ نیز قابلیت روش‌های مذکور در

تشخیص آسیب، به‌صورت چندین شاخص قابل بررسی در تمام آنها بررسی شده است. بررسی اطلاعات جداول ۱ و ۲ نشان می‌دهد که می‌توان از روش تبدیل موجک به‌عنوان یک روش قدرتمند در تشخیص موقعیت آسیب‌های یک سیستم سازه‌ی استفاده کرد زیرا:

۱. هزینه‌ی محاسباتی در روش تبدیل موجک پایین است و در مطالعاتی که علاوه بر مدل اجرای محدود، مدل‌سازی فیزیکی از سازه وجود دارد نیز به‌خوبی قابل استفاده است.
۲. روش تبدیل موجک نیازمند حداقل اطلاعات در فرایند تشخیص آسیب است (سیگنال‌های ارتعاشی که به سادگی با تحریک سازه، قابل استخراج از مدل‌های تجربی و تحلیلی است) که در مقایسه با سایر روش‌های تشخیص آسیب یک برتری محسوب می‌شود.
۳. با توجه به این‌که روش تبدیل موجک نوعی تحلیل زمان-بسامد ^۲ برای یک سیگنال ارتعاشی محسوب می‌شود، در این روش تشخیص آسیب‌های جزئی حتی با وجود اغتشاشات محیطی در حین استخراج سیگنال‌های ارتعاشی کاملاً امکان‌پذیر است.
۴. محدودیتی در تشخیص نوع آسیب در این روش وجود ندارد. ضمناً علاوه بر شناسایی موقعیت آسیب‌های تک‌^۳ امکان تشخیص موقعیت آسیب‌های چندتایی ^۴ نیز در این روش وجود دارد. درحالی‌که برخی روش‌ها در این زمینه دارای محدودیت‌هایی در تعداد یا در شدت آسیب‌اند. از این‌رو در این تحقیق روش تشخیص آسیب بر پایه‌ی تبدیل موجک، مبنای محاسبات در بخش‌های بعدی قرار می‌گیرد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۰/۲۰، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۲۰.

DOI:10.24200/J30.2021.56201.2808

جدول ۱. خلاصه‌ی روش‌های رایج تشخیص آسیب بر پایه‌ی اطلاعات ارتعاشی و فرایند به‌کار رفته در آنها به‌منظور تشخیص آسیب.

انواع روش تشخیص آسیب	اصول به‌کار رفته در روش
روش بر پایه‌ی بسامدهای طبیعی ^[۱۲]	استفاده از تغییرات بسامدهای طبیعی در تشخیص آسیب‌های احتمالی.
روش بر پایه‌ی تابع پاسخ بسامدی ^[۱۳]	استفاده از تغییرات بسامدی در قالب ثبت پاسخ یک سیستم دینامیکی در بسامدهای مختلف به بار واحد به‌منظور تشخیص آسیب‌های احتمالی.
روش بر پایه‌ی اشکال مودی ^[۱۴]	استفاده از تغییرات یا مشتقات اشکال مودی در پیش‌بینی آسیب‌های سازه.
روش بر پایه‌ی انرژی کرنشی مودال ^[۱۵]	استفاده از تغییرات پارامترهای مودال سازه همچون ماتریس سختی و به دنبال آن انرژی کرنشی مودال در تشخیص آسیب‌های احتمالی.
روش بر پایه‌ی ماتریس نرمی ^[۱۶]	استفاده از تغییرات پارامترهای مودال سازه همچون ماتریس نرمی در تشخیص آسیب‌های احتمالی سازه.
روش بر پایه‌ی بردار نیروی باقی‌مانده ^[۱۷]	استفاده از تغییرات پارامترهای مودال سازه همچون بسامدهای طبیعی، اشکال مودی و ماتریس جرم در فرایند تشخیص آسیب.
روش بر پایه‌ی به‌هنگام‌سازی مدل ^[۱۸]	استفاده از برخی پارامترهای مودال و اصلاح مقادیر آنها در طی فرایند به‌هنگام‌سازی به‌منظور تشخیص آسیب‌های احتمالی.
روش بر پایه‌ی تبدیل موجک ^[۱۹]	نوعی تحلیل زمان - بسامد برای یک تحلیل سیگنال ارتعاشی محسوب می‌شود. با استفاده از تبدیل موجک، نقاط تکیه در سیگنال مشخص و به عنوان محل آسیب احتمالی معرفی می‌شود.
روش بر پایه‌ی شبکه‌ی عصبی ^[۲۰]	اشاره به محاسباتی دارد که ساختار آن متشکل از واحدهای پردازشگری همچون نرون‌های بیولوژیکی است که چندین ورودی و یک خروجی دارند (آموزش شبکه).
روش بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک ^[۲۱]	بهینه‌سازی توابع بر اساس تغییرات تصادفی با تعریف تابع هدف در فرایند تشخیص آسیب‌ها.

مکانیکی ارزیابی کرد. بررسی نتایج نهایی نشان داد که: الف) به‌کارگیری پارامترهای مذکور در روش اسکالوگرام در مقایسه با روش اسپکتروگرام در تشخیص آسیب‌های موضعی چرخ‌دنده‌ها از دقت بسیار بالاتری برخوردار است؛ حتی زمانی که بار وارد شده بر چرخ دنده‌ها مقدار اندکی باشد و ب) پارامترهای وابسته به زمان نه تنها در فرایند تشخیص آسیب چرخ‌دنده‌ها بسیار کاربردی هستند، بلکه هرگونه تغییر در بار وارد شده بر چرخ دنده را نیز به خوبی نشان می‌دهند. مطالعات بیشتر در این زمینه توسط مراجع^[۸-۱۱، ۷۵-۷۷] انجام شده است.

بررسی تحقیقات مذکور نشان می‌دهد که اکثر سازه‌های مورد بررسی در فرایند تشخیص آسیب بر پایه‌ی روش اسکالوگرام، غیرعمرانی و بدون پیچیدگی‌های خاص سازه‌ی‌اند. از این رو در این تحقیق فرایند تشخیص آسیب در پایه‌های یک اسکله‌ی شمع و عرشه‌ی دلفینی بر پایه‌ی روش نسبتاً جدید تابع چگالی انرژی (اسکالوگرام) تبدیل موجک پیوسته بررسی شد. بدین منظور در ادامه بعد از معرفی اجمالی روش پیشنهادی: ۱. مدل سه‌بعدی یک اسکله‌ی شمع و عرشه‌ی دلفینی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شد، ۲. آسیب‌هایی از نوع خوردگی در برخی پایه‌های سازه و در سه سناریوی مختلف (آسیب‌های تکی و چندتایی) شبیه‌سازی شد، ۳. در هر مرحله قبل و پس از شبیه‌سازی آسیب، تحلیل بسامدی انجام و اولین شکل مودی^{۱۴} اسکله‌ی شمع و عرشه استخراج شد، ۴. مطابق با هر سناریوی شبیه‌سازی آسیب و پس از هر مرحله‌ی تحلیل بسامدی، مقادیر عددی شکل مودی پایه‌ی آسیب دیده از مقادیر عددی شکل مودی همان پایه در وضعیت سالم کسر شد و بدین ترتیب سیگنال ارتعاشی موردنظر در انجام فرایند تشخیص آسیب به دست آمد (مثلاً مطابق با اولین سناریوی شبیه‌سازی آسیب در پایه‌ی شماره ۲ اسکله، مقادیر عددی شکل مودی این پایه درگره‌های مشخصی در دو وضعیت آسیب‌دیده و سالم استخراج شد و سپس از یکدیگر کسر شد)، ۵. روش پیشنهادی به‌منظور تشخیص محل آسیب یا آسیب‌های محتمل، بر سیگنال‌های ارتعاشی به دست آمده، اعمال شد و ۶. در نهایت کارایی روش پیشنهادی مورد بحث قرار گرفت. در تحقیق حاضر فرایند تشخیص آسیب اولاً با به‌کارگیری انرژی موجک که از حساسیت بالایی نسبت

یکی از مهم‌ترین نوع آسیب‌ها در یک سیستم سازه‌ی، آسیب از نوع ترک است که شناسایی و نمایان کردن آنها در همان مراحل اولیه در زمره‌ی روش‌های پیش سلامت سازه‌ی است. در این مسیر تلاش‌های زیادی توسط محققان انجام شده است که در ادامه به تعدادی از این تجربه‌ها بر پایه‌ی روش تبدیل موجک به‌طور مختصر اشاره می‌شود.

سیسیلایورت^۵ [۵] بر پایه‌ی تبدیل موجک پیوسته و با به‌کارگیری روش بسامد میانگین اسکالوگرام،^۶ به تشخیص آسیب‌های ایجاد شده در ابزارهای سوراخ‌کننده (مته‌ها) پرداخت. در روش نام‌برده: الف) یک قطعه‌ی فلزی بر روی دستگاه سوراخ‌کاری^۷ نصب شد، ب) در نوک مته‌ی دستگاه آسیب‌هایی به شکل‌های مختلف ایجاد شد، ج) بر روی دستگاه سوراخ‌کاری و در کنار مته شتاب‌سنجی به‌منظور اندازه‌گیری سیگنال‌های ارتعاشی نصب شد، د) به ازای سرعت‌های مختلف چرخش مته، عملیات سوراخ‌کاری بر روی صفحه‌ی فلزی انجام شد و سیگنال‌های ارتعاشی در دو وضعیت مته‌ی سالم و آسیب دیده به‌منظور انجام فرایند تشخیص آسیب استخراج شد. بررسی نتایج نشان داد که سرعت چرخش مته تأثیر زیادی روی بسامد میانگین اسکالوگرام دارد و تغییرات بسامد میانگین از حساسیت بالایی نسبت به وجود آسیب‌های بسیار جزئی برخوردار است. همچنین یک شاخص جدید به‌منظور تشخیص شدت آسیب نیز معرفی شد و نتایج آن نشان داد که شاخص آسیب معرفی شده نه تنها به وجود آسیب بسیار حساس است بلکه به کوچک‌ترین تغییرات سرعت سوراخ‌کاری نیز حساسیت بسیار بالایی دارد. اوزترک^۸ و همکاران^۶ با استفاده از روش تابع چگالی انرژی سیگنال (اسکالوگرام) و شاخص بسامد میانگین به تشخیص موقعیت آسیب‌های ایجاد شده در چرخ‌دنده‌ها پرداختند. آنها ابتدا بر روی نمونه‌ی فیزیکی چرخ دنده‌های گیربکس یک سیستم محرک مجموعه‌ی از آسیب‌های سطحی را ایجاد کردند و بعد از اندازه‌گیری سیگنال‌های ارتعاشی فرایند تشخیص آسیب‌ها را با روش مذکور به انجام رساندند. سیسیلایورت^۷ کارایی چهار پارامتر وابسته به زمان (انرژی آبی،^۹ بسامد میانگین،^{۱۰} بسامد میانه^{۱۱} و پهنای باند^{۱۲}) را بر پایه‌ی استفاده از روش اسکالوگرام و اسپکتروگرام^{۱۳} تبدیل موجک پیوسته در تشخیص خرابی موضعی چرخ‌دنده‌های

جدول ۲. قابلیت‌های انواع روش‌های تشخیص آسیب بر پایه‌ی اطلاعات ارتعاشی در تشخیص آسیب‌های سازه‌ی بی به صورت کلی.

روش	هزینه‌ی محاسباتی	تعیین محل خرابی	قابلیت تشخیص وسعت آسیب	قابلیت تشخیص نوع آسیب	حساسیت جواب به خطای محاسباتی	گستره‌ی کاربرد	قابلیت ترکیب با دیگر روش‌ها
روش بر پایه‌ی بسامدهای طبیعی	پایین [۲۱،۲۲]	امکان‌پذیر است [۲۵،۲۴]	عمدتاً آسیب‌های شدید را تشخیص می‌دهد [۲۴]	عمدتاً آسیب‌های تکی را تشخیص می‌دهد [۲۵]	وجود دارد [۲۲]	بیشتر در سازه‌های ساده و یک بعدی کاربرد دارند [۲۳]	-
روش بر پایه‌ی تابع پاسخ بسامدی	بالا [۲۷]	امکان‌پذیر است [۱۳]	فاقد محدودیت خاصی هستند [۲۸]	هر نوع آسیبی را تشخیص می‌دهد [۲۷]	وجود دارد [۲۶]	در اکثر سازه‌ها قابل استفاده است [۲۸،۱۳]	دارد [۲۹،۲۸]
روش بر پایه‌ی اشکال مودی	بالا [۲۸]	امکان‌پذیر است [۳۱]	فاقد محدودیت‌اند [۳۰،۳۰]	هر نوع آسیبی را تشخیص می‌دهد [۳۲]	به میزان زیادی وجود دارد [۳۲]	در اکثر سازه‌ها قابل استفاده است [۳۵،۳۴]	دارد [۳۷،۳۵]
روش بر پایه‌ی ماتریس نرمی	پایین [۴۴]	امکان‌پذیر است [۴۰،۴۰]	آسیب‌های شدید را با دقت بالاتری تشخیص می‌دهد [۳۸،۳۸]	هر نوع آسیبی را تشخیص می‌دهد [۴۷،۴۲]	با وجود خطا همچنان نتایج دارای دقت بالاست [۴۶]	در اکثر سازه‌ها قابل استفاده است [۴۳،۴۵]	دارد [۴۵،۴۱]
روش بر پایه‌ی نیروی بر پایه‌ی بردار نیروی باقی‌مانده	بالا [۵۱]	امکان‌پذیر است [۵۲]	فاقد محدودیت است [۴۹]	هر نوع آسیبی را تشخیص می‌دهد [۵۱]	به میزان زیادی وجود دارد [۵۰]	در اکثر سازه‌ها قابل استفاده است [۵۱،۴۵]	دارد [۴۸]
روش بر پایه‌ی به‌هنگام‌سازی مدل	بسیار بالاست [۵۷]	امکان‌پذیر است [۵۴]	آسیب‌های جزئی را با دقت بالاتری تشخیص می‌دهد [۵۶]	هر نوع آسیبی را تشخیص می‌دهد [۵۵]	با وجود خطا همچنان نتایج دارای دقت بالاست [۵۶]	کاربرد روش در سازه‌های بزرگ و پیچیده دشوار است [۵۷]	دارد [۵۳]
روش بر پایه‌ی تبدیل موجک	پایین [۱۹]	امکان‌پذیر است [۵۸]	فاقد محدودیت است [۶۲]	هر نوع آسیبی را تشخیص می‌دهد [۶۲]	با وجود خطا همچنان نتایج دارای دقت بالاست [۶۰]	در اکثر سازه‌ها قابل استفاده است [۵۹]	دارد [۶۱]
روش بر پایه‌ی شبکه‌ی عصبی	بسیار بالاست [۶۵]	امکان‌پذیر است [۶۶]	فاقد محدودیت است [۶۸]	هر نوع آسیبی را تشخیص می‌دهد [۶۹]	میزان خطا تا حدی قابل کنترل است [۶۹]	در اکثر سازه‌ها قابل استفاده است [۶۴]	دارد [۶۷]
روش بر پایه‌ی استفاده از الگوریتم ژنتیک	بستگی به انتخاب تابع هدف دارد [۷۰]	امکان‌پذیر است [۶۶]	فاقد محدودیت است [۷۴]	هر نوع آسیبی را تشخیص می‌دهد [۷۱]	وجود دارد [۷۳]	در اکثر سازه‌ها قابل استفاده است [۷۱،۷۰]	دارد [۷۱]

ضمناً چناقلو و همکاران [۷۵] فرایند تشخیص آزمایشگاهی آسیب در پایه‌های اسکله‌ی شمع و عرشه‌ی دلفینی را بر پایه‌ی روش تبدیل موجک بسته‌ی نیز بررسی کردند که در بخش ۵ به تفاوت نتایج روش مذکور با روش پیشنهادی در این مطالعه پرداخته شده است.

۲. نظریه‌ی تبدیل موجک پیوسته و تابع چگالی انرژی موجک

اسکالوگرام یا تابع چگالی انرژی سیگنال $x(t)$ عبارت است از مجذور قدرمطلق تبدیل موجک پیوسته، پس در ادامه‌ی این بخش، ابتدا مظهریه‌ی تبدیل موجک پیوسته و سپس نظریه‌ی اسکالوگرام معرفی شده است.

به تغییرات جزئی در یک سیگنال ارتعاشی برخورداری است، انجام شده است و ثانیاً بدون استخراج یک رابطه‌ی تحلیلی مشخص با عنوان شاخص آسیب به‌طور مستقیم با محاسبه‌ی چگالی انرژی تبدیل موجک پیوسته یا اسکالوگرام موقعیت دقیق آسیب تعیین شده است. نتایج پایانی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در سناریوهای شبیه‌سازی آسیب چندتایی بدون هیچ‌گونه خطای اضافی موقعیت سه آسیب ایجاد شده را نشان می‌دهد؛ در حالی‌که در روش معرفی شده در مرجع [۷۵] در وضعیت مشابه خطاهای اضافی دیده می‌شود. بنابراین براساس توضیحات داده شده می‌توان مهم‌ترین نوآوری تحقیق حاضر را به‌کارگیری روش حذف رابطه‌ی تحلیلی شاخص آسیب و در عین حال استفاده از انرژی موجک در قالب مفهوم اسکالوگرام در فرایند تشخیص آسیب دانست که در نتیجه‌ی آن با افزایش تعداد موقعیت آسیب‌ها، به‌هیچ عنوان از دقت روش کاسته نشده و به درستی موقعیت تمام آسیب‌ها تشخیص داده شده است.

این منحنی، چگالی انرژی سیگنال را در صفحه‌ی مقیاس (بسامد) بر حسب جابه‌جایی (زمان) نشان می‌دهد. در واقع منحنی اسکالوگرام درصد انرژی هر یک از ضرایب تبدیل موجک به‌ازای مقیاس‌های متفاوت را به تصویر می‌کشد (ضرایب تبدیل موجک از تجزیه‌ی سیگنال ارتعاشی به دست می‌آید). انرژی ضرایب موجک حساسیت بالایی نسبت به تغییرات ناگهانی ایجاد شده در سیگنال‌های ارتعاشی دارند. این تغییرات عمدتاً نشان از وجود آسیب‌های محتمل در سیگنال‌های مورد بررسی دارند. از این رو می‌توان از تغییرات انرژی ضرایب موجک در قالب شاخص تابع چگالی انرژی سیگنال به‌عنوان یک گزینه‌ی کارآمد در فرایند تشخیص آسیب‌های یک سیستم سازه‌ی استفاده کرد.

۳. شبیه‌سازی اسکله‌ی شمع و عرشه‌ی دلفینی

به‌منظور انجام فرایند تشخیص آسیب براساس روش پیشنهادی، مدل اجزای محدود سه‌بعدی یک اسکله‌ی شمع و عرشه دلفینی توسط نرم افزار ABAQUS شبیه‌سازی شد. ابعاد و مشخصات عرشه و پایه‌های مدل مذکور در جدول ۳ به نمایش در آمده است.

در فرایند مدل‌سازی عرشه و پایه‌ها از اجزای سه‌بعدی انعطاف‌پذیر استفاده شد. با این توضیح که عرشه با اجزای چهارگوش ده‌گه‌ی (C3۱۰D) ^{۱۹} و ابعاد مش ۶۰ میلی‌متری و پایه‌ها با اجزای آجری هشت‌گه‌ی (C3D۸R) ^{۲۰} و ابعاد مش ۵ میلی‌متری شبیه‌سازی شد. انتخاب بهینه‌ی ابعاد مش اجزاء بر اساس تحلیل حساسیت انجام پذیرفت، به‌گونه‌ی که با درشت‌تر کردن ابعاد مش دقت نتایج نهایی کاهش می‌یافت و با ریزتر کردن ابعاد مش تغییر محسوسی در نتایج نهایی اتفاق نمی‌افتاد (با ریزتر کردن ابعاد مش از ۶۰ میلی‌متر برای عرشه و ۵ میلی‌متر برای پایه‌ها، اختلاف عددی بسامد ارتعاش آزاد سازه با آنچه در شکل ۲ به‌دست آمده است، کمتر از یک‌درصد بود). ضمناً اتصال پایه‌ها به عرشه نیز از نوع اتصال گیردار و با دستور Merge از زیرشاخه‌ی مونتاژ ^{۲۱} در نرم افزار مذکور انجام شد. نمایشی از مدل اسکله‌ی دلفینی با جزئیات مربوطه در شکل ۱ به نمایش در آمده است. همان‌گونه که در این شکل پیداست به‌منظور اطمینان از عدم حرکت پایه‌ها در بستر، تا ارتفاع ۷۰ میلی‌متری از انتهای هر پایه گیردار فرض شده است. همچنین قسمت داخلی عرشه در محل اتصال با پایه‌ها دارای فرورفتگی‌هایی به عمق ۲۵ میلی‌متر است که به موجب آن رفتار عرشه و پایه‌ها در اثر اعمال بارهای وارده به‌صورت کاملاً هماهنگ انجام می‌پذیرد.

جدول ۳. ابعاد و مشخصات سازه‌ی اسکله‌ی دلفینی.

جزئیات سازه‌ی		
قطر بیرونی = ۵۲٫۶mm	مقطع (دایره)	
ضخامت = ۵٫۲mm		
۱۰۸۵mm	ارتفاع	پایه‌ها
E = ۲۰۵Gpa	مدول یانگ	
ρ = ۷۸۵۰ kg/m ^۳	جرم حجمی	
ابعاد		
۸۱۲٫۵mm × ۴۰۵٫۲۵mm	ضخامت	
۶۰mm		عرشه
E = ۱٫۵Gpa	مدول یانگ	
ρ = ۹۰۰ kg/m ^۳	جرم حجمی	

تبدیل موجک، روش جدیدی برای تحلیل سیگنال است. ^[۸۰] موجک‌ها ترکیبی از یک خانواده‌ی توابع پایه هستند که توانایی بازبینی سیگنال را در محدوده‌ی زمان (یا مکان) و بسامد (یا مقیاس) دارند. این تبدیل انواع مختلفی دارد که هر کدام دارای کاربردهای منحصر به فردی هستند. از جمله می‌توان به تبدیل موجک پیوسته، تبدیل موجک ایستا، تبدیل موجک گسسته و موجک‌های بسته‌ی اشاره کرد. در واقع تبدیل موجک بر این اصل استوار است که هر سیگنال می‌تواند به مجموعه‌ی از توابع موضعی که موجک نامیده می‌شود، تبدیل شود. هر نوع و بزرگی موضعی یک سیگنال را می‌توان با استفاده از توابع موجکی مربوطه مورد تحلیل و بررسی قرار داد. تبدیلات موجک به نقاط تکیه ^{۱۵} در سیگنال‌ها حساس‌اند و می‌توان از همین موضوع برای پیدا کردن تغییرات تند و ناگهانی در سیگنال‌های ارتعاشی که اغلب نشان‌دهنده‌ی آسیب‌اند، استفاده کرد. تبدیل موجک پیوسته‌ی سیگنال ارتعاشی $x(t)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود. ^[۷۸-۸۱]

$$CWT_x(a, b) = \int x(t) \psi_{b,a}^*(t) dt \quad (۱)$$

$\psi(t)$ تابع موجک مادر ^{۱۶} نامیده می‌شود و می‌توان با استفاده از مقادیر a (پارامتر مقیاس) و b (پارامتر انتقال) آن را به مجموعه‌ی از توابع اساسی $\psi_{a,b}(t)$ به شکل زیر تبدیل کرد.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (۲)$$

$$a = 2^{-j}, b = 2^{-j} k, \quad (۳)$$

در روابط بالا z و k اعداد صحیح، * علامت معرف مزدوج مختلط و ψ^* مزدوج مختلط تابع موجک است. بنابراین تبدیل موجک، با ضرب داخلی سیگنال $x(t)$ و نسخه‌ی انتقال یافته و مقیاس‌شده‌ی تابع تکی $\psi(t)$ به دست می‌آید. به‌عبارت دقیق‌تر، سه پارامتر مقیاس، جابه‌جایی و تابع موجک مادر در نتیجه‌ی تبدیل موجک مؤثر هستند. از آن‌جا که تبدیل موجک یک تبدیل خطی است، معکوس‌پذیر است. معکوس تبدیل موجک بر اساس رابطه‌ی ۴ قابل محاسبه است. ^[۸۲،۸۳]

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} CWT_x(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) db \frac{da}{a^2}, \quad (۴)$$

پارامتر C_ψ در رابطه‌ی ۴ با عنوان شرط مقبولیت ^{۱۷} یا شرط پذیرفتگی برای موجک $\psi(t)$ شناخته می‌شود که می‌توان با استفاده از مجذور تابع فوری $|H(f)|^2$ آن را محاسبه کرد.

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |H(f)|^2 \frac{df}{|f|} \langle \infty \quad (۵)$$

همچنین براساس نظریه‌ی پارسیوال ^{۱۸} انرژی نهایی سیگنال $x(t)$ به‌صورت رابطه‌ی ۶ قابل محاسبه است.

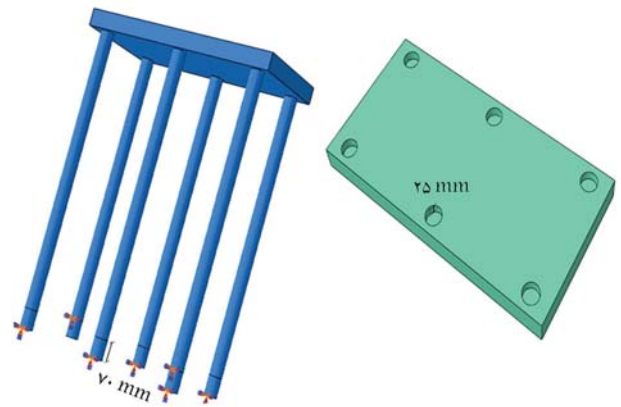
$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |CWT_x(a, b)|^2 db \frac{da}{a^2}, \quad (۶)$$

عبارت $|CWT_x(a, b)|^2$ در رابطه‌ی ۶ که معادل مجذور قدرمطلق تبدیل موجک پیوسته است، چگالی انرژی یا اسکالوگرام نامیده می‌شود. منحنی اسکالوگرام تبدیل موجک، یکی از روش‌های نشان دادن محتوای این تبدیل بر حسب پارامترهای جابه‌جایی و مقیاس است که به‌صورت زیر بیان می‌شود. ^[۸۱،۸۶]

$$SG_x(a, b) = |CWT_x(a, b)|^2 \quad (۷)$$

جدول ۴. تعریف پایه‌ها و اجزای آسیب دیده در اسکله‌ی دلفینی.

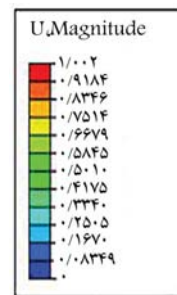
موقعیت آسیب موقعیت گره	شماره‌ی جزء	محدوده‌ی آسیب	تعریف سناریوهای شبیه آسیب	
			پایه‌ی شماره	سناریوی
۶-۵	۵	پایه‌ی شماره ۲	a	سناریوی
۱۴-۱۳	۱۳	پایه‌ی شماره ۱	b	سناریوی
۱۹-۱۸	۱۸			
۵-۴	۴			
۹-۸	۸	پایه‌ی شماره ۳	c	سناریوی
۱۶-۱۵	۱۵			



شکل ۱. نمایی از اسکله‌ی دلفینی مدل شده در نرم‌افزار ABAQUS.

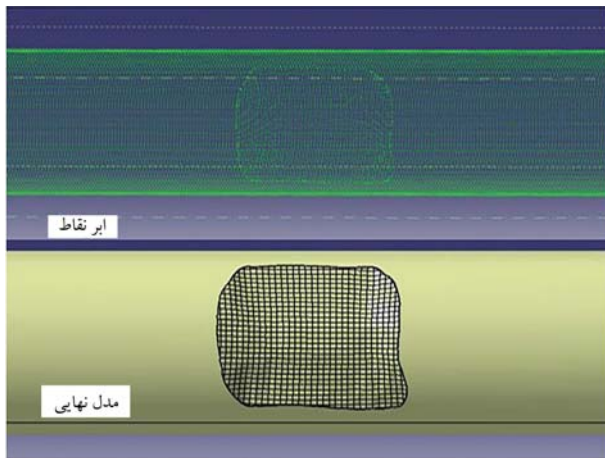


شکل ۳. دستگاه اسکنر سه‌بعدی به منظور اسکن پایه‌های آسیب دیده.



شکل ۲. نمایی از مدل عددی اسکله‌ی دلفینی در اولین شکل مودی استخراج شده.

همان‌طوری که پیش‌تر و در بخش ۱ عنوان شد، فرایند تشخیص آسیب بر اساس روش پیشنهادی، نیاز به تحلیل بسامدی به منظور دسترسی به مقادیر اشکال مودی بر روی پایه‌های سازه دارد. از این رو پس از ایجاد مدل عددی اسکله‌ی دلفینی در نرم‌افزار مذکور، تحلیل بسامدی انجام و اولین شکل مودی استخراج شد. شکل ۲ نمایی از اسکله‌ی دلفینی در اولین شکل مودی با بسامد ارتعاش آزاد ۳۴/۸۲۴ هرتز را به نمایش می‌گذارد. ضمناً معتبرسازی نتایج مدل عددی به‌طور مفصل در مرجع [۷۵] که توسط نویسندگان تحقیق حاضر در سال ۲۰۲۰ چاپ شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

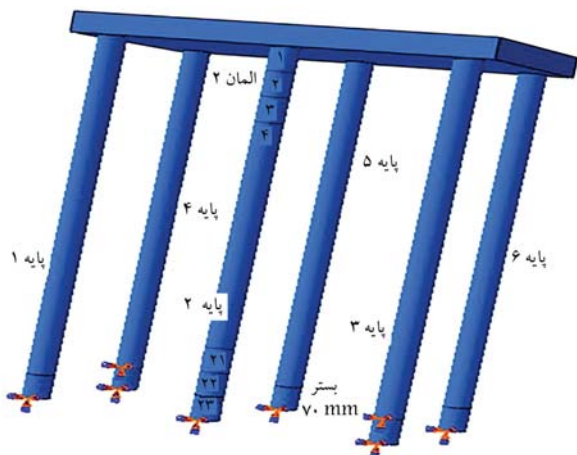


شکل ۴. نمایی از فایل ابرنقاط پایه‌ی آسیب‌دیده‌ی اسکله‌ی دلفینی و پردازش نهایی آن در نرم‌افزار CATIA.

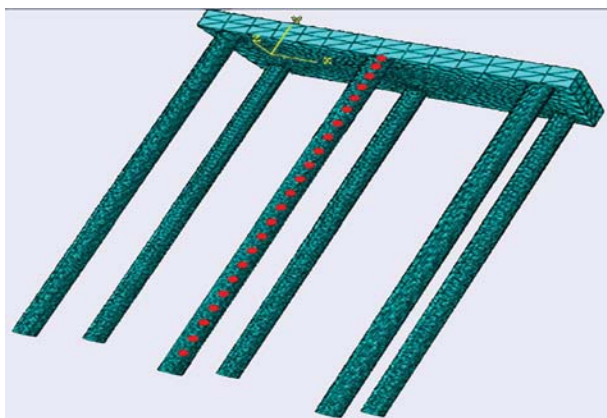
فایلی با نام ابرنقاط از هر پایه به دست آمد، (د) فایل ابرنقاط در نرم‌افزار CATIA پردازش شد و مدل عددی پایه‌ی آسیب دیده دقیقاً همانند نمونه‌ی فیزیکی استخراج شد و در نهایت (ه) مدل عددی پایه‌ی پردازش شده در قالب یک فایل ورودی به نرم‌افزار ABAQUS معرفی شد. شکل ۳ نمایی از دستگاه اسکنر سه‌بعدی استفاده شده در فرایند شبیه‌سازی آسیب را نشان می‌دهد. بخشی از فایل ابرنقاط که در نرم‌افزار CATIA مورد پردازش قرار گرفته است در شکل ۴ به نمایش درآمده است.

۴. سناریوهای شبیه‌سازی آسیب در پایه‌ها

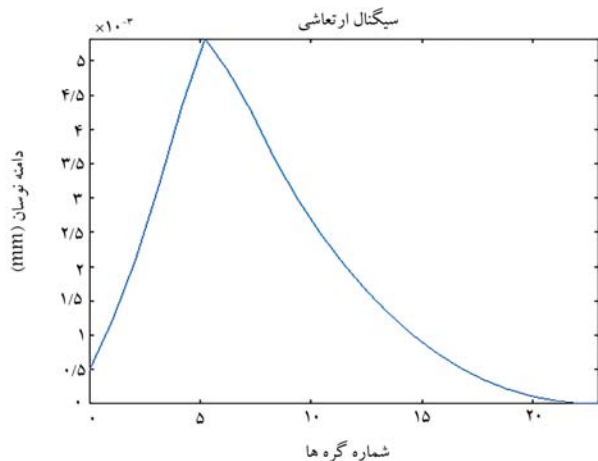
در این تحقیق به منظور انجام فرایند تشخیص آسیب در پایه‌های اسکله‌ی دلفینی، سه سناریوی شبیه‌سازی آسیب تکی و چندتایی تعریف شد. جدول شماره ۴، موقعیت اجزای آسیب دیده بر اساس سناریوهای تعریف شده را به نمایش می‌گذارد. در انتخاب نوع آسیب، محتمل‌ترین نوع آن یعنی خوردگی پایه‌ها مدنظر قرار گرفت. خوردگی در پایه‌ها به شکلی کاملاً واقعی و با شدت جزئی ایجاد شد، به این صورت که: الف) مطابق اطلاعات جدول ۳ سه عدد پایه‌ی فیزیکی تهیه شد، ب) آسیب‌های جزئی از نوع خوردگی و به صورت خراشیدگی‌های نامنظمی توسط دستگاه سنگ‌فرز بر روی جدار بیرونی پایه‌ها ایجاد شد، ج) پایه‌ها توسط دستگاه اسکنر سه‌بعدی اسکن شد و



شکل ۸. نحوه‌ی شماره‌گذاری گره‌ها و اجزا بر روی هر پایه‌ی اسکله.



شکل ۹. نمایی از گره‌های انتخاب شده بر روی یکی از پایه‌های اسکله‌ی دلفینی.

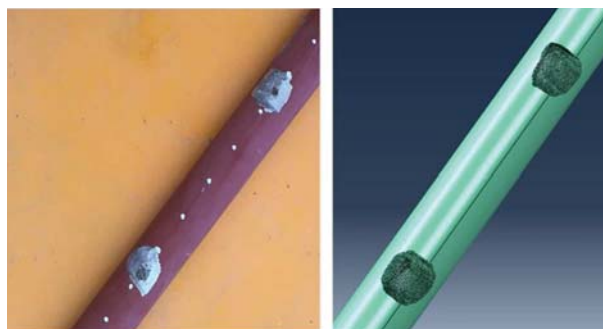


شکل ۱۰. اختلاف مقادیر عددی شکل مودی پایه‌ی آسیب دیده از پایه‌ی سالم به‌عنوان سیگنال ارتعاشی استخراج شده مطابق با سناریوی شبیه‌سازی آسیب a.

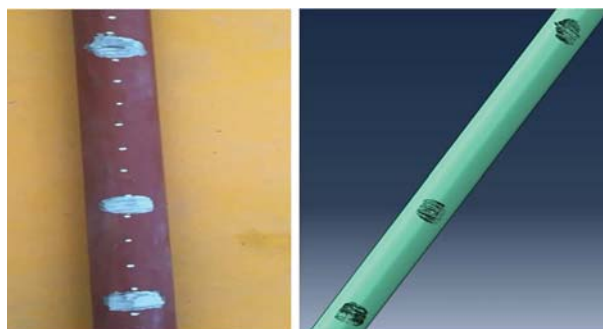
اولین شکل مودی سازه، ۲. محاسبه‌ی اختلاف مقادیر عددی شکل مودی پایه‌ی آسیب‌دیده با شکل مودی پایه‌ی سالم در نقاط مشخص شده روی هر پایه مطابق شکل ۹ به‌عنوان یک سیگنال ارتعاشی مجزا (شکل ۱۰) یک نمونه از این سیگنال‌های ارتعاشی به دست آمده در پایه‌ی شماره ۲ را به نمایش می‌گذارد، ۳. اعمال تبدیل موجک پیوسته بر هر سیگنال ارتعاشی استخراج شده به‌منظور محاسبه‌ی ضرایب



شکل ۵. مقایسه‌ی شبیه‌سازی عددی و فیزیکی هندسه‌ی آسیب (سناریوی a).



شکل ۶. مقایسه‌ی شبیه‌سازی عددی و فیزیکی هندسه‌ی آسیب (سناریوی b).



شکل ۷. مقایسه‌ی شبیه‌سازی عددی و فیزیکی هندسه‌ی آسیب (سناریوی c).

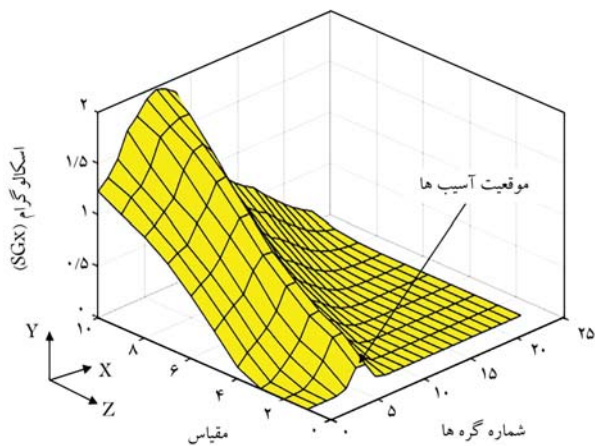
همچنین مقایسه‌ی شبیه‌سازی عددی و فیزیکی هندسه‌ی آسیب از نوع خوردگی در پایه‌های اسکله‌ی دلفینی در اشکال ۵ تا ۷ ترسیم شده است. فایل ابرنقاط به دست آمده توسط دستگاه اسکنر سه‌بعدی فقط توسط نرم‌افزار CATIA قابل بازگشایی و پردازش است.

در شکل ۸ نیز نحوه‌ی شماره‌گذاری پایه‌های اسکله، گره‌ها و اجزای هر پایه نشان داده شده است.

۵. فرایند شناسایی آسیب با استفاده از تابع چگالی انرژی سیگنال

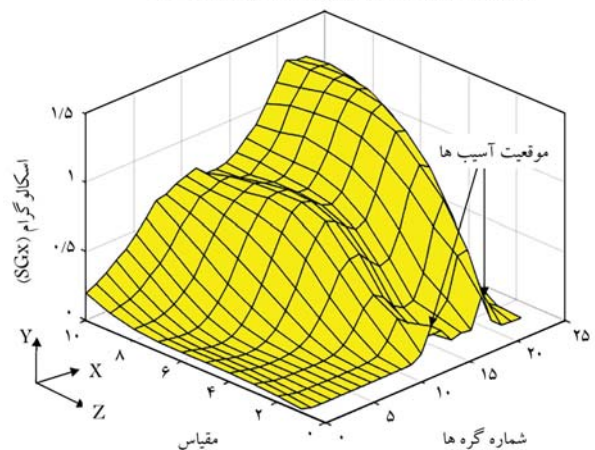
در این تحقیق فرایند شناسایی آسیب پایه‌های یک اسکله‌ی دلفینی با استفاده از تابع چگالی انرژی سیگنال و در قالب ۴ مرحله‌ی کلی به انجام رسید. این مراحل عبارت‌اند از: ۱. انجام تحلیل بسامدی در دو وضعیت سالم و آسیب دیده و استخراج

اولین شکل مودی، موجک گاوسی مختلط مرتبه ۴ (Gaus ۴)



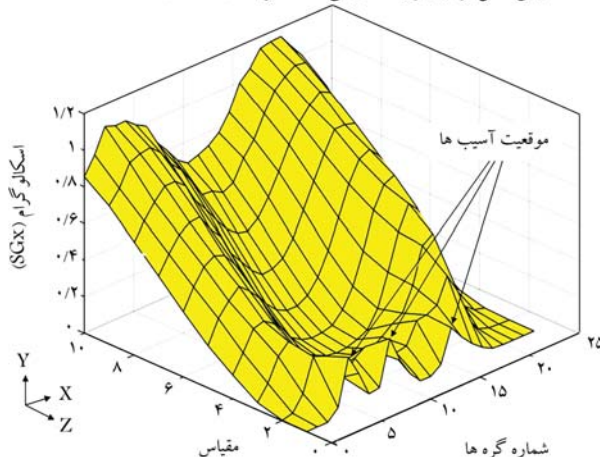
شکل ۱۲. منحنی اسکالوگرام پایه‌ی اسکله در وضعیت آسیب دیده مطابق با سناریوی شبیه‌سازی آسیب a.

اولین شکل مودی، موجک گاوسی مختلط مرتبه ۱ (Gaus ۱)



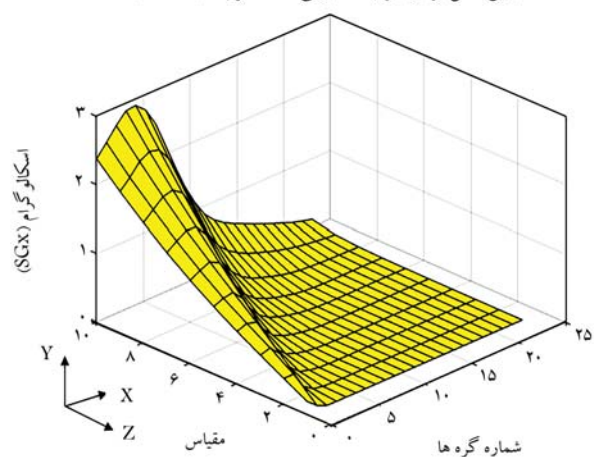
شکل ۱۳. منحنی اسکالوگرام پایه‌ی اسکله در وضعیت آسیب دیده مطابق با سناریوی شبیه‌سازی آسیب b.

اولین شکل مودی، موجک گاوسی مختلط مرتبه ۱ (Gaus ۱)



شکل ۱۴. منحنی اسکالوگرام پایه‌ی اسکله در وضعیت آسیب دیده مطابق با سناریوی شبیه‌سازی آسیب c.

اولین شکل مودی، موجک گاوسی مختلط مرتبه ۴ (Gaus ۴)



شکل ۱۱. منحنی اسکالوگرام پایه‌ی اسکله در وضعیت سالم.

موجک و در نهایت ۴. محاسبه‌ی تابع چگالی انرژی یا منحنی اسکالوگرام ضرایب موجک به صورت نمودارهای سه‌بعدی و تشخیص موقعیت آسیب در پایه‌های اسکله (مرحله ۱ با مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS و مراحل ۲ تا ۴ با کدنویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است). پیش‌تر نیز بیان شد که یکی از ویژگی‌های اصلی روش پیشنهادی عدم نیاز به محاسبه‌ی رابطه‌ی تحلیلی شاخص آسیب و به نوعی حذف خطاهای محاسباتی مربوطه در تشخیص اجرای آسیب دیده است. ضمناً به منظور استخراج مقادیر جابه‌جایی گره‌ها بر روی پایه‌های سازه در اولین شکل مودی (مرحله ۱)، ابتدا بر روی جدار بیرونی پایه‌ی مورد نظر مطابق با شکل ۸ تعداد ۲۳ گره در نظر گرفته شد و سپس مقادیر جابه‌جایی این گره‌ها پس از هر بار تحلیل بسامدی اولین شکل مودی سازه در دو وضعیت سالم و آسیب دیده استخراج شد. شکل ۹ نمایی از گره‌های قرمز رنگ انتخاب شده بر روی پایه‌ی شماره ۲ را نشان می‌دهد.

پس از شبیه‌سازی آسیب‌ها در مدل اجزای محدود اسکله‌ی دلفینی (ایجاد سه مدل مجزا متناسب با سناریوهای شبیه‌سازی آسیب a تا c)، فرایند تشخیص آسیب بر اساس مراحل ۱ تا ۴ به انجام رسید و نتایج به صورت نمودارهای سه‌بعدی (اشکال ۱۱ تا ۱۴) ترسیم شد. در این نمودارها محور Z میزان چگالی انرژی یا اسکالوگرام ضرایب موجک، محور X شماره‌ی گره اجزاء بر روی هر پایه‌ی اسکله و محور Y تعداد مقیاس استفاده شده در محاسبه‌ی ضرایب موجک را ترسیم می‌کند. یکی از نکات مهم در ترسیم منحنی اسکالوگرام انتخاب نوع موجک و تعداد مقیاس به منظور محاسبه‌ی چگالی انرژی ضرایب موجک است. در تحقیق حاضر نوع موجک در یک فرایند سعی و خطا به گونه‌ی که بهترین نتایج ممکن در تشخیص اجزای آسیب دیده رخ دهد، برای سناریوی شبیه‌سازی a موجک گاوسی مختلط ۲۲ مرتبه ۴ (cgau4) و برای سناریوهای b و c شبیه‌سازی موجک گاوسی مختلط مرتبه ۱ (cgau1) انتخاب شد. پارامتر مقیاس نیز به صورت صعودی با انتخاب اعداد در محدوده‌ی ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته شد (انتخاب عدد همیشه ۱۰ بر اساس انجام تحلیل حساسیت صورت پذیرفت).

همان‌گونه که از نمودارهای ترسیم شده در اشکال (۱۲ تا ۱۴) پیداست در طول پایه‌ی اسکله و گره‌هایی که آسیب در محل آنها افتاده است، اغتشاشاتی در میزان چگالی انرژی ضرایب موجک (محور Z) دیده می‌شود که در واقع نشان‌دهنده‌ی موقعیت دقیق آسیب یا آسیب‌های تحمیلی است. مثلاً در شکل ۱۲ که بر اساس

ب) فرایند تشخیص اجزای آسیب دیده در روش پیشنهادی مرجع^[۷۵] با معرفی و استفاده از یک شاخص آسیب جدید انجام شد. در حالی که روش ارائه شده در این تحقیق بدون استفاده از شاخص آسیب موقعیت دقیق تمام اجزای آسیب‌دیده را تعیین کرد. شاخص آسیب یک رابطه‌ی تحلیلی است که با توجه به ساده‌سازی انجام شده در فرایند استخراج آن به صورت ناخواسته دارای درصدی خطاست. قطعاً حذف شاخص آسیب منجر به کاهش خطاهای محاسباتی در فرایند تشخیص آسیب می‌شود. نتایج تشخیص اجزای آسیب دیده مطابق با سناریوی شبیه‌سازی c بر اساس روش ارائه شده در مرجع^[۷۵] همراه با یک خطای پیش‌بینی اضافی است؛ اما بر پایه‌ی روش پیشنهادی در این تحقیق (شکل ۱۴) هیچ خطای پیش‌بینی اضافی در تشخیص موقعیت اجزای آسیب‌دیده رخ نداده است. پس از منظر تعداد خطا در پیش‌بینی موقعیت اجزای آسیب‌دیده، روش پیشنهادی در این تحقیق در مقایسه با روش مرجع^[۷۵] از دقت بالاتری برخوردار است.

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق کارایی روش تابع چگالی انرژی (منحنی اسکالوگرام) تبدیل موجک پیوسته، در تشخیص آسیب پایه‌های مدل عددی یک اسکله‌ی دلفینی ارزیابی شد. آسیب به صورت جزئی و از نوع خوردگی روی جدار خارجی برخی از پایه‌های اسکله ایجاد شد و بر اساس آن سه سناریوی شبیه‌سازی آسیب تکمی و چندتایی تعریف شد. مطابق مراحل ۱ تا ۴ در بخش ۵ فرایند تشخیص موقعیت اجزای آسیب‌دیده در پایه‌های اسکله‌ی دلفینی انجام شد و نتایج آنها در اشکال (۱۱ تا ۱۴) به نمایش درآمد. بررسی نتایج نمودارهای ارائه شده در اشکال مذکور نشان داد:

الف) روش پیشنهادی با دقت قابل قبولی قادر به تشخیص موقعیت دقیق اجزای آسیب‌دیده بدون هیچ‌گونه خطای اضافی در پایه‌های اسکله شمع و عرشه دلفینی است؛

ب) حذف رابطه‌ی تحلیلی با عنوان شاخص آسیب موجب حذف خطاهای محاسباتی و در نتیجه تشخیص موقعیت دقیق تمام اجزای آسیب‌دیده در پایه‌های سازه شد. در واقع می‌توان مهم‌ترین مزیت روش پیشنهادی را حذف رابطه‌ی تحلیلی شاخص آسیب در فرایند تشخیص اجزای آسیب دیده دانست؛

ج) نتایج حاصل نشان داد روش پیشنهادی از حساسیت بسیار بالایی به کوچک‌ترین اغتشاشات موجود در سیگنال‌های ارتعاشی برخوردار است و قابلیت لازم برای تشخیص موقعیت آسیب‌های هم‌زمان را داراست.

نتایج سناریوی شبیه‌سازی آسیب a در پایه‌ی شماره ۲ اسکله‌ی دلفینی ترسیم شده است، موقعیت آسیب در جزء شماره ۵ واقع در حد فاصل گره‌های شماره ۵ و ۶ با یک اغتشاش کاملاً واضح در منحنی اسکالوگرام نمایان است.

همچنین بررسی شکل ۱۰ نشان می‌دهد بیشترین تغییرات در حد میکرومتر در دامنه‌ی نوسان، مربوط به موقعیت گره‌های شماره ۵ تا ۷ با اجزای شماره ۵ و ۶ است. اما نمی‌توان با تکیه بر این اطلاعات به راحتی تشخیص داد که مطابق سناریوی شبیه‌سازی آسیب a، محل وقوع آسیب کدام یک از اجزای شماره ۵ یا ۶ است. به عبارتی صرفاً محاسبه‌ی اختلاف مقادیر عددی شکل مودی پایه‌ی آسیب‌دیده با شکل مودی پایه‌ی سالم در نقاط مشخص شده روی پایه‌ی مورد نظر به درستی محل وقوع آسیب‌ها را نشان نمی‌دهد. با این حال هنگامی که این نمودار (شکل ۱۰) به عنوان یک سیگنال ارتعاشی به ابزار تبدیل موجک پیوسته معرفی و چگالی انرژی ضرایب موجک محاسبه می‌شود، مطابق شکل ۱۲ به راحتی موقعیت دقیق آسیب در جزء شماره ۵ و حد فاصل گره‌های شماره ۵ و ۶ هویدا می‌شود. علت آن را نیز می‌توان حساسیت بسیار بالای چگالی انرژی ضرایب موجک به کوچک‌ترین نامنظمی در سیگنال‌های ارتعاشی دانست که طبیعتاً این نامنظمی در سیگنال ارتعاشی استخراج شده (شکل ۱۰) در محدوده‌ی گره‌های شماره ۵ و ۶ بیشتر از سایر گره‌هاست.

نکته‌ی دیگری که از بررسی اشکال (۱۲ تا ۱۴) می‌توان به آن پی برد، تشخیص موقعیت دقیق تمام آسیب‌ها بدون هیچ‌گونه خطای اضافی است که پیش‌تر علت آن حذف رابطه‌ی تحلیلی شاخص آسیب یا به نوعی حذف خطاهای محاسباتی در شناسایی اجزای آسیب‌دیده اعلام شد. ضمناً مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش به‌کارگیری شده در این مطالعه با نتایج تحقیق^[۷۵] در مورد فرایند تشخیص آزمایشگاهی آسیب در پایه‌های اسکله‌ی شمع و عرشه دلفینی به صورت زیر ارائه می‌شود.

الف) روش پیشنهادی در این تحقیق بر اساس استخراج نتایج اولین شکل مودی از پایه‌های اسکله‌ی دلفینی قادر به انجام فرایند تشخیص آسیب در سازه است. در حالی که روش ارائه شده در مرجع^[۷۵] با استخراج سیگنال‌های ارتعاشی (نمودارهای زمان - جابه‌جایی) از نقاطی مشخصی روی پایه‌های سازه فرایند تشخیص آسیب را به انجام می‌رساند. کاملاً مشخص است که استخراج سیگنال‌های ارتعاشی در مقایسه با استخراج اشکال مودی از مدل‌های سازه‌ی خصوصاً در مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از ابزارهای ساده‌تری صورت می‌پذیرد. از این رو از دیدگاه پارامترهای ارتعاشی ورودی به منظور انجام فرایند تشخیص آسیب روش ارائه شده در مرجع^[۷۵] نسبت روش پیشنهادی در این تحقیق در اولویت قرار دارد؛

پانویس‌ها

1. structural health monitoring
2. time-frequency
3. single damages
4. multiple damages
5. yesilyurt
6. scalogram
7. milling machine
8. Ozturk
9. instantaneous energy
10. mean frequency

11. median frequency
12. band width
13. spectrogram
14. mode shape
15. singularities
16. mother wavelet
17. admissible condition
18. parseval's theorem
19. ten-node tetrahedral elements
20. eight-node brick elements
21. assembly
22. complex gaussian wavelet

منابع (References)

1. Banks, H.T., Inman, D.J. and Wang, Y. "An experimentally validated damage detection theory in smart structures", *Journal of Sound and Vibration*, pp. 859-880 (1996).
2. Messina, A., Williams, E.J. and Contursi, T. "Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method", *Journal of Sound and Vibration*, **216**, pp. 791-808 (1998).
3. Koh, B.H. and Dyke, S.J. "Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation sensitivity modal data", *Computers & Structures*, **85**, pp. 117-130 (2007).
4. Guo, H.Y. and Li, Z.L. "A two-stage method to identify structural damage sites and extents by using evidence theory and micro-search genetic algorithm", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **23**, pp. 769-782 (2009).
5. Yesilyurt, Isa. "End mill breakage detection using mean frequency analysis of scalogram", *International Journal of Mechanic Tools & Manufacture*, **46**, pp. 767-782 (2006).
6. Ozturk, H., Sabuncu, M. and Yesilyurt, I. "Early detection of pitting damage in gears using mean frequency of scalogram", *Journal of Vibration and Control*, **14**(4), pp. 469-484 (2008).
7. Yesilyurt, Isa. "The application of the conditional moments analysis to gearbox fault detection-a comparative study using the spectrogram and scalogram", *NDT & E International*, **4**, pp. 309-320 (2004).
8. Dayang, Li., Maosen, G., Tongfa, D. and et al. "Wavelet packet singular entropy-based method for damage identification in curved continues girder bridges under seismic excitations", *MDPI, Sensos*, 4272(19), (2019).
9. Vang, P. and Sh, Q. "Damage Identification in structures based on energy curvature difference of wavelet packet transform", *Hindawi Shock and Vibration*, 1-13 (2018).
10. Hsueh, W. and Loh, C.H. "Damage detection of structures by wavelet analysis: application to seismic response of steel frame", *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil Mechanical and Aerospace System* (2017).
11. Abdulkareem, M., Bakhary, N., Vafaei, M. and et al. "Application of two-dimensional wavelet transform to detect damage in steel plate structures", *Measurement*, **146**, pp. 912-923 (2019).
12. Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. and et al. "Damage Identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review", Los Alamos, LA-13070-MS, UC-900, ISSued: May (1996).
13. Jimin, H. and Zhi-Fang, F. "Modal Analysis", Plant A Tree (2001).
14. Evins, D.J., *Modal Testing: Theory and Practice*, Letchworth: research studies press (1984).
15. Seyedpoor, S.M. "A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **47**, pp 1-8 (2012).
16. Xia, Y. and Hao, H. "Statistical damage identification of structures with frequency changes", *Journal of Sound and Vibration*, **263**, pp. 853-870 (2003).
17. Kosmatka, J.B. and Ricles, J.M. "Damage detection in structures by modal vibration characterization", *Journal of Structural Engineering*, **125**(12), pp. 1384-1392 (1999).
18. Reidel, D. and Nijhoff, W. "Finite element model updating in structural dynamics", Kluwer Academic, USA, pp 100-121 (1995).
19. Daubechies, I. "Ten lecture on Wavelets", *CBMS-NSF, Conference Series 61*, Philadelphia, PA: SIAM (1992).
20. Waszczyszyn, Z. and Ziemianski, L. "Neural networks in mechanics of structures and materials new results and prospects of application", *Computers and Structures*, **79**, pp. 2261-2276 (2001).
21. Michalewicz, Z. and Fogel, D.B. "How to solve it: modern heuristics", Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag (2000).
22. Carden, E. and Fannig, P. "Vibration based condition monitoring: a review", *Structural Health Monitoring*, **3**(55) (2004).
23. Charles, R., Farrer, R. and Doebling, S.W. "Damage detection II", Field Application to Large Structure, Los Alamos National Laboratory, MS P945, New Mexico, USA, 87545.
24. Chen, H.L., Spyrakos, C.C. and Venkatesh, G. "Evaluating structural detection by dynamic response", *Journal of Structural Engineering*, **121**(8), pp. 1197-1204 (1995).
25. Choy, F.K., Liang, R. and Xu, P. "Fault identification of beams on elastic foundation", *Computers and Geotechnics*, **17**, pp. 157-176 (1995).
26. Wang, Z., Lin, R.M. and Lim, M.K. "Structural damage detection using measured FRF data", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **147**, pp. 187-197 (1997).
27. Lee, U. and Shin, J. "A frequency response function-based structural damage identification method", *Computer and Structures*, **80**, pp. 117-132 (2002).
28. Carden, E.P. and Fanning, P.J. "An added mass identification algorithm based on frequency response functions", *In: 2nd MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*, Boston, 17-20 June, **2**, pp. 1880-1882, ISBN 0-08-044046-0 (2003).
29. Sampaio, R.P.C., Maia, N.M. and Silva, J.M.M. "Damage detection using the frequency-response-function curvature method", *Journal of Sound and Vibration*, **226**(5), pp. 1029-1042 (1999).
30. Wong, J.M. and Lam, H.F. "Damage detection in steel framed structures by vibration measurement approach", *Proceeding of the 12th International Modal Analysis Conference*, Bethel (1994).
31. Ren, W.X. and De Roeck, G. "Structural damage identification using modal data. I: simulation verification", *Journal of Structural Engineering*, **128**(1), pp. 87-95 (2002a).
32. Ren, W.X. and De Roeck, G. "Structural damage identification using modal data. II: Test verification", *Journal of Structural Engineering*, **28**(1), pp. 96-104 (2002b).

33. Perera, R. and Torres, R. "Structural damage detection via modal data with genetic algorithms", *Journal of Structural Engineering*, **132**(9), pp. 1491-1501 (2006).
34. Wahab, M.M.A. "Effect of modal curvatures on damage detection using model updating", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **15**(2), pp. 439-445 (2001).
35. Oh, B.H. and Jung, B.S. "Structural damage assessment with combined data of static and modal tests", *Journal of Structural Engineering*, **124**(8), pp. 956-965 (1998).
36. Fox, C.H.J. "The location of defects in structures: a comparison of the use of natural frequency and mode shape data", *Proceeding of the 10th International Modal Analysis Conference*, (1992).
37. Park, G., Muntges, D.E. and Inman, D.J. "Self-monitoring and Self-Healing Jointed Structures", *Key Engineering Materials Vols*, **204-205**, pp 75-84 (2001).
38. Charles, R., Farrer, R. and Doebling, S.W. "Damage detection II", Field Application to Large Structure, Los Alamos National Laboratory, MS P945, New Mexico, USA, 87545.
39. Law, S.S., Shi, Z.Y. and Zhang, L.M. "Structural damage detection from incomplete and noisy modal test data", *Journal of Engineering Mechanics*, **124**(11), pp. 1280-1288 (1998).
40. Worden, K., Manson, G. and Allman, D.J. "An experimental appraisal of the strain energy damage location method", In: *Damage Assessment of Structures, Proceeding of the 4th International Conference on Damage Assessment of Structures, Cardiff, Wales, UK, June, key Engineering Materials, Vols 204-205*, pp. 35-46 (2001).
41. Shi, Z.Y., Law, S.S. and Zhang, L.M. "Structural damage detection from modal strain energy change", *Journal of Engineering Mechanics*, **126**, pp. 1216-1223 (2000).
42. kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. and et al. "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs. model-shape-based method", *Engineering Structures*, **25**, pp. 57-67, (2003).
43. Dong Xu, Z. and Zhishen, Wu. "Energy damage detection strategy based on acceleration response for long-span bridge structures", *Engineering Structures*, **29**, pp 609-617 (2007).
44. Li, G.Q., Hao, K.C., Lu, Y. and et al. "A flexibility approach for damage identification of cantilever-type structures with bending and shear deformation", *Computers and Structures*, **73**, pp. 562-572 (1999).
45. Zhongdong, D., Duirong, Y., Jinping, O. and et al. "Damage localization in ambient vibration by constructing proportional flexibility matrix", *Journal of Sound and Vibration*, **284**, pp 455-466 (2005).
46. Jaishi, B. and Ren, W.X. "Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual", *Journal of Sound and Vibration*, **290**, pp 369-387 (2006).
47. Zhao, J. and Dewolf, J.T. "Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection", *Journal of Structural Engineering*, **125**(4), pp. 410-416 (1999).
48. Farhat, C. and Hemez, F.M. "Updating finite element dynamic models using an element-by-element sensitivity methodology", *AIAA Journal*, **31**(9), pp. 1702-1711 (1993).
49. Samman, M.M. and Biswas, M. "Vibration testing for nondestructive evaluation of bridges. I: Theory", *Journal of Structural Engineering*, **120**(1), pp. 269-289 (1994a).
50. Liu, P.L. "Identification and damage detection of trusses using modal data", *Journal of Structural Engineering*, **121**(4), pp. 599-608 (1995).
51. Doebling, S.W. "Minimum-rank optimal update of element stiffness parameters for structural damage identification", *AIAA Journal*, **34**(12), pp. 2615-2621 (1996).
52. Yang, Q.W. "A numerical technique for structural damage detection", *Applied Mechanics and Computation*, **215**, pp. 2775-2780 (2009).
53. Wahab, M.M.A., De Roeck, G. and Peeters, B. "Parameterization of damage in reinforced concrete structures using model updating", *Journal of Sound and Vibration*, **228**(4), pp. 717-730 (1999).
54. Maeck, J., Wahab, M.A., Peeters, B. and et al. "Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination", *Engineering Structures*, **22**, pp. 1339-1349 (2000).
55. Jang, J.H., Yeo, I., Shin, S. and et al. "Experimental investigation of system-identification-based damage assessment on structures", *Journal of Structural Engineering*, **128**(5), pp. 673-682 (2002).
56. Ma, Ge. and Eric, M. "Structural damage identification using system dynamic properties", *Computers and Structures*, **83**, pp. 2185-2196 (2005).
57. Law, S.S., Chan, T.H.T. and Wu, D. "Efficient numerical model for the damage detection of large scale engineering structures", *Engineering Structures*, **23**, pp. 436-451 (2001).
58. Mallat, S.G., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 2nd ed, London: Academic Press (1999).
59. Li, B., Chen, X.F., Ma, J.X. and et al. "Detection of crack location and size in structures using wavelet finite element methods", *Journal of Sound and Vibration*, **285**, pp 767-782 (2005).
60. Han, J.G., Ren, W.X. and Sun, Z.S. "Wavelet packet based damage identification of beam structures", *International Journal of Solids and Structures*, **42**, pp. 6610-6627 (2005).
61. Rucka, M. and Wilde, K. "Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates", *Journal of Sound and Vibration*, **297**, pp 536-550 (2006).
62. Beskhyroun, S., Oshima, T. and Mikami, S. "Wavelet based technique for structural damage detection", *Structural Control and Health Monitoring*, **17**, pp 473-494 (2010).
63. Douka, E., Loutridis, S. and Trochidis, A. "Crack identification in beams using wavelet analysis", *International Journal of Solids and Structures*, **40**, pp 3557-35697 (2003).
64. Waszczyszyn, Z. and Ziemianski, L. "Neural networks in mechanics of structures and materials new results and prospects of application", *Computers and Structures*, **79**, pp. 2261-2276 (2001).

65. Zubaybi, A., Haddara, M.R. and Swamidas, A.S.J. "Damage identification in a ships structure using neural networks", *Ocean Engineering*, **29**, pp. 1187-1200 (2002).
66. Barai, S.V. and Pandey, P.C. "Time-delay neural networks in damage detection of railway bridges", *Advances in Engineering Software*, **28**, pp. 1-10 (1997).
67. Marwala, T. "Damage identification using committee of neural networks", *Journal of Engineering Mechanics*, **126**(1), pp. 43-50 (2000).
68. Lee, J.J., Lee, J.W., Yi, J.H. and et al. "Neural networks-based damage detection for bridges considering errors in baseline finite element models", *Journal of Sound and Vibration*, **280**, pp 555-578 (2005).
69. Li, Z.X. and Yang, X.M. "Damage identification for beams using ANN based on statistical property of structural responses", *Computers and Structures*, **86**, pp. 64-71 (2008).
70. Herman, G. and Rane, B. "Modal analysis for damage detection in structures", *Journal of Structural Engineering*, **117**, pp. 3042-3063 (1991).
71. Moslem, K. and Nafaspor, R. "Structural damage detection by genetic algorithms", *AIAA Journal*, **40**(7), pp. 1395-1401 (2002).
72. Gomes, H.M., Silva, N.R.S., "Some comparisons for damage detection on structures using genetic algorithms and modal sensitivity method", *Applied Mathematical Modeling*, **32**, pp. 2216-2232 (2008).
73. Naserlavi, S.S., Salajegheh, J., Salajegheh, E. and et al. "An improved genetic algorithm using sensitivity analysis and micro search for damage", *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, **11**(6), pp. 717-740 (2010).
74. Chaekuk, N.A., Sun-pil, K. and Kwak, H. "Structural damage evaluation using genetic algorithm", *Journal of Sound and Vibration*, **330**, pp. 2772-2783 (2011).
75. Karami, V., Mgharabaghi, A.R. and Chenaghloou, M.R. "A combination of wavelet packet energy curvature difference and richardson extrapolation for structural damage detection", *Applied Ocean Research*, **101**, 102224 (2020).
76. Abdulkareem, M., Bakhary, N., Vafaei, M. and et al. "Non-probabilistic Wavelet method to consider uncertainties in structural damage detection", *Journal of Sound and Vibration*, **443**, pp. 77-98 (2018).
77. Parrany, A. "Damage detection in circular cylindrical shells using active thermography and 2-D discrete wavelet analysis", *Thin-Walled Structures*, **136**, pp. 34-49 (2019).
78. Yen, G.G. and Lin, K.C. "Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring", *IEEE T Ind Electron*, **47**, pp. 650-667 (2000).
79. Coifman, R.R. and Wickerhauser, M.V. "Entropy-based algorithms for best basis selection", *IEEE Transactions on Information Theory*, **38**, pp. 713-718 (1992).
80. Kim, H. and Melhem, H. "Damage detection structures by wavelet analysis", *Engineering Structures*, **26**, pp. 347-362 (2004).
81. Peng, Z.K. and Chu, F.L. "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics", *A Review With Bibliography, Mechanical Systems and Signal Processing*, **18**(2), pp. 199-221 (2004).
82. Mallat, S.G. "A Theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", *IEEE Trans: Pattern Anal. Machine Learning*, **11**, pp. 674-693 (1989).
83. MALLAT, S.G., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 2nd ed, London: Academic Press (1999).